

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2013

VU VAN HOANG

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



VU VAN HOANG

**Studie Potenciálních Přínosů Hybridního Pohonu Městských
Autobusů**

Study on The Potential Benefits of City Hybrid Buses

Vedoucí Práce: Doc. Ing. Josef Laurin, CSc.

Konzultant Práce: Ing. Martin Pechout.

Rozsah práce:

- o Počet stran: 56**
- o Počet obrázků: 12**
- o Počet tabulek: 1**
- o Počet grafů: 16**

Liberec 2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení:

Hoang VU VAN

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Obor:

2302R022 Stroje a zařízení

Zaměření:

Dopravní stroje a zařízení

Ve smyslu ZÁKONA č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

STUDIE POTENCIÁLNÍCH PŘÍNOSŮ HYBRIDNÍHO POHONU MĚSTSKÝCH AUTOBUSŮ

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Proved'te rešerši dosavadního využití hybridních elektrických pohonů v městských autobusech. Popište základní koncepty uspořádání hybridních pohonů (například sériový a paralelní hybrid, využití akumulátorů a/nebo superkondenzátorů) a jejich výhody a nevýhody při nasazení v autobusech městské a příměstské dopravy.
2. Pro konkrétní autobus s hybridním pohonem (nemusí jít o sériově vyráběný typ) připravte zjednodušený výpočtový model toků výkonu. Uvažte výkon potřebný na překonání jízdních odporů, tedy stoupání, rozjezd, valivý a aerodynamický odpor. Navrhněte pokrytí těchto odporů výkonem ze spalovacího motoru a elektromotoru s ohledem na dobíjení úložiště energie. Vycházejte ze známých parametrů a z naměřených dat nebo kvalifikovaných odhadů.
3. Měřením pomocí GPS, či jiným způsobem, zjistěte typický jízdní profil během jízdy autobusu na vybrané lince v libereckém regionu. Na tento jízdní profil aplikujte vytvořený model. Proved'te odhad spotřeby paliva pro klasický a hybridní pohon a zhodno'te přínos hybridního pohonu z hlediska spotřeby paliva a emisí skleníkových plynů.

Anotace:

Hlavním cílem této práce je studie potenciálních přínosů hybridního pohonu městských autobusů. Důvodem je velký zájem výrobců o tuto problematiku a perspektiva této konstrukce v nejbližších letech. Zavedení těchto vozidel by mělo pozitivní vliv na ekologii a ekonomii provozu, stejně jako na zlepšení trakčních a dynamických vlastností.

Dále je zde uveden přehled možných zdrojů elektrické energie, stručný přehled současných autobusů s těmito pohony a pokud byly dostupné, tak i jejich parametry. Podklady pro tuto práci tvoří především zahraniční odborná literatura a informace ze sítě internet.

Klíčová slova:

Hybridní pohony, sériový hybridní pohon, paralelní hybridní pohon, hybridní autobusy, akumulátor energie.

Annotation:

The main objective of this thesis is study on the potential benefits of city hybrid buses. The purpose is a strong producers' interest in these problems, and the perspective of this construction in coming years. Using these vehicles would positively influence ecology and operating economy, as well as the improvement of traction and dynamic qualities.

Furthermore, a survey of possible electricity sources, a brief survey of present buses using these driving mechanism and their parameters if available, are introduced. All the data used for this thesis are mostly acquired in foreign technical literature and in the internet.

Keywords:

Hybrid drives, serial hybrid powertrain, parallel hybrid powertrain, hybrid buses, energy accumulator.

Čestné Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “Studie potenciálních přínosů hybridního pohonu městských autobusů“ vypracoval samostatně pod Doc. Ing. Josef Laurin, CSc. K řešení práce jsem použil znalosti, které jsem získal během studia na Fakultě strojní, dále z odborných seminářů a množství odborné literatury uvedené na konci zadané bakalářské práce.

V Liberci dne prosince 2013

Vu Van Hoang

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce pod Doc. Ing. Josef Laurin, CSc za řadu cenných rad a konzultací, které mi pomohly úspěšně dokončit bakalářskou práci.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martin Pechout za jeho odborné vedení, všestrannou pomoc, vstřícnost a ochotu při tvorbě této bakalářské práce.

VU VAN HOANG

Obsah:

1.0 Důvody pro použití hybridních pohonů u autobusů	09
1.1 Co znamená pojem „hybridní pohon“?.....	09
1.2 Důvody pro použití hybridních pohonů.....	09
2.0 Historie hybridních autobusů.....	12
3.0 Emise výfukových plynů.....	16
4.0 Přehled typů hybridních pohonů používaných u autobusů	17
4.1 Koncepce uspořádání hybridního pohonu	17
4.1.1 Sériová koncepce uspořádání	17
4.1.2 Paralelní koncepce uspořádání.....	19
4.1.3 Kombinovaná koncepce uspořádání.....	20
5 Vlastní výpočtový model.....	23
5.1 Jízdní model při jízdě po rovině	23
5.2 Energetická bilance uvažovaného jízdního cyklu	27
5.3 Popis výpočtového modelu pro reálnou jízdu.....	30
5.3.1 Klidná městská jízda.....	34
5.3.2 Agresivní městská jízda.....	36
5.4 Jízdní model při reálně městské jízdě s převýšením.....	38
5.4.1 Jízda na lince číslo 15 od Husova do Šaldovo náměstí.....	41
5.4.2 Jízda na lince číslo 15 od Poliklinika do Husova.....	43
5.4.3 Jízda na lince číslo 25 od Tržní náměstí do Hlávková.....	45
5.4.4 Jízda na lince číslo 12 od Růžodol I do Šaldovo náměstí.....	47
5.4.5 Jízda na lince číslo 30.....	49
5.4.6 Jízda na lince číslo 12 od Pavlovice Letná do Dožínková.....	51
6.Závěr.....	53

1. Důvody pro použití hybridních pohonů u autobusů

1.1 Co znamená pojem „hybridní pohon“

Hybridním pohonem je nazýván takový pohon, který využívá několika různých zdrojů energie, pro pohon jednoho dopravního prostředku.

Slovem "hybridní" se rozumí kombinace několika zdrojů energie pro pohon jednoho dopravního prostředku. Může se jednat např. o spalovací motor, elektromotor a akumulátor, palivový článěk, elektromotor a akumulátor, spalovací motor a setrvačník apod. Nejčastěji se používá kombinace spalovacího motoru, elektromotoru a akumulátor.

Druhy hybridních pohonů:

- spalovací motor + elektromotor + akumulátor
- spalovací motor + elektromotor + externí přívod elektrické energie (trolej)
- spalovací motor + setrvačník
- elektromotory + diesel
- plynová turbína + generátor + akumulátor + elektromotor
- elektromotor + nožní pohon

1.2 Důvody pro použití hybridních pohonů

Největším důvodem pro zavádění hybridních pohonů do automobilů je nízká účinnost spalovacích motorů. Účinnost dnešních spalovacích motorů se pohybuje přibližně mezi 30 až 40%.

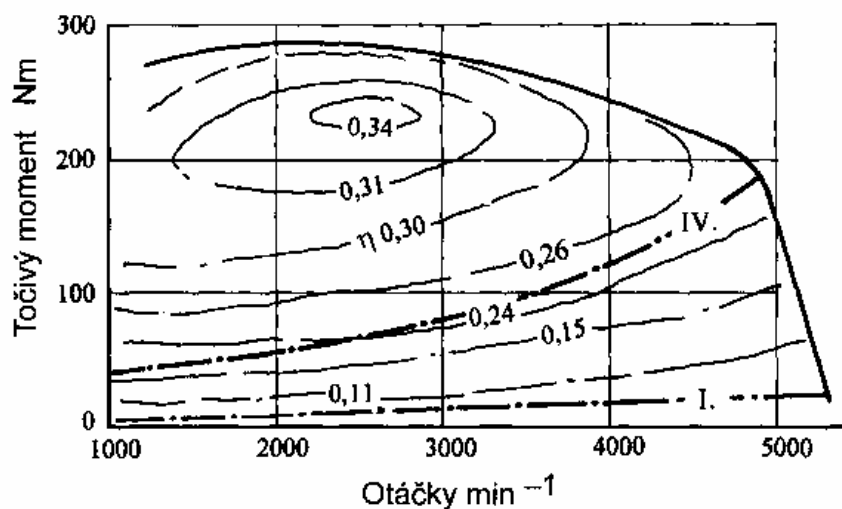
Zážehové (benzínové) motory mají obecně účinnost spíše nižší na spodní hranici pásma, vznětové (dieselové) motor/y jsou na tom o trochu lépe. Hodnota účinnosti spalovacích motorů je však z větší části dána účinností samotného termodynamického cyklu, ten má jasná fyzikální omezení. V budoucnosti se tedy nedá očekávat výraznější vylepšení účinnosti klasických spalovacích motorů.

Další potíží je v tom, že této účinnosti spalovací motor dosáhne jen v optimálních podmínkách. Samozřejmě při běžném provozu se optimálních podmínek dosáhne pouze

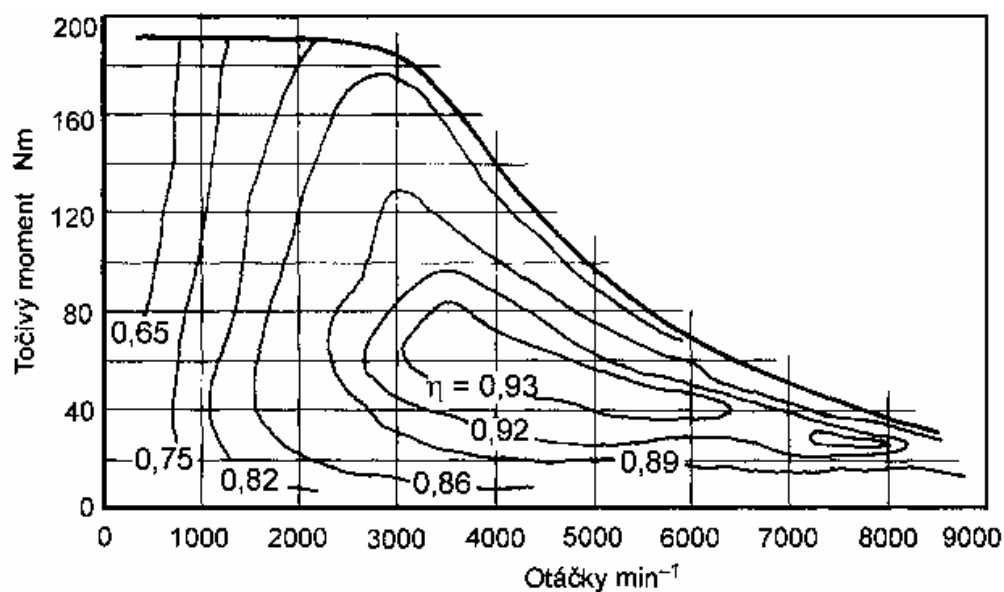
výjimečně a to znamená, že celková účinnost je ještě o něco nižší. Extrémním případem je běh motoru na volnoběh. Motor spotřebovává palivo, ale přitom automobil nekoná žádnou práci, protože stojí na místě. Navíc je spalovací motor schopen uspokojivě pracovat pouze v poměrně úzkém pásmu otáček. To je také důvod, proč automobil se spalovacím motorem potřebuje převodovku.

Použití převodovky ovšem přináší další nezanedbatelné ztráty, ostatně jako každý mechanický převod. Navíc má většinou jen omezený počet rychlostních stupňů a to je dalším důvodem, proč nemůže motor pracovat v optimálních podmínkách (samozřejmě existují i převodovky s plynulou změnou převodového poměru, ty ale mají zase o něco horší účinnost).

Naproti tomu současné elektromotory mají účinnost kolem 95%. Navíc této vysoké účinnosti dosahují v širokém rozsahu otáček a zatížení. Jeví se tedy jako ideální řešení konstrukce elektromobilu. Jeho nevýhodou je ale příliš vysoká hmotnost potřebných akumulátorů. S tím souvisí i malý dojezd na jedno nabití baterií. Navíc obtížné a pomalé dobíjení baterií čistokrevný elektromobil vyřazuje ze hry.



Obr.1.1 Pole účinností spalovacího motoru (převzato z [1])



Obr.1.2 Pole účinností elektromotoru(převzato z [1])

Kombinace spalovacího motoru a elektromotoru umožňuje

- bezemisní pohon v oblastech zatížených škodlivými emisemi při velmi krátkých úsecích jízdy
- meziměstský provoz se spalovacím motorem při němž jsou vyšší výkony a velké dojezdy zákazníky všeobecně požadovány.

➤ Výhody a nevýhody hybridních autobusů:

Výhody:

Možnost využití více agregátu na jednu (př. zážehový motor + elektromotor). Jízda na čistě elektrickou energii zaručuje tichou jízdu s nulovými emisemi nízká spotřeba paliva (úspora 20-30%).

Nízké provozní náklady

Využití rekuperace elektrické energie (např. při brzdění)

Tichý (je-li zrovna aktivován elektromotor)

Nevýhody:

Příliš velká hmotnost automobilu (baterie,přídavný pohon-př. elektromotor atd.)

Velká prodejní cena autobusů s hybridním pohonem

Nedostatek stanic pro dobíjení akumulátorů

Nárůst ceny a složitosti zařízení (vyšší složitost ->vyšší poruchovost -> vyšší cena za údržbu).

Vysoká hmotnost baterií při malé kapacitě. Baterie jsou rovněž dosti drahé. Otázkou je také životnost těchto baterií.

2. Historie hybridních autobusu

Společnost Daimler má nejdelší a nejrozsáhlejší zkušenosti s využíváním hybridních pohonů ve vozidlech. V roce 1969 představila svůj první hybridní autobus (viz obr. 2.1).

V současné době vyrábí hybridní autobus Mercedes-Benz Citaro G Blue Tec Hybrid (viz obr. 2.2).



Obr.2.1 První hybridní autobus značky Mercedes Benz z roku 1969



Obr.2.2 Mercedes-Benz Citaro G Blue Tec Hybrid

U autobusu Mercedes-Benz Citaro G Blue Tec Hybrid se jedná o technologicky nejvíce náročný sériový hybridní pohon, který na krátkých úsecích umožňuje bezemisní jízdu v čistě bateriovém provozu. Pohon je nainstalován v kloubovém autobusu typu Citaro G a funguje prostřednictvím čtyř motorů v nábojích kol střední a zadní nápravy. V této kombinaci je hybridní kloubový autobus naprosto jedinečný.

Dieslový motor nepracuje u sériového hybridního autobusu jako trvalý hnací agregát, ale slouží jako pohon generátoru pro výrobu proudu v případě potřeby. Vyrobený proud akumulují bezúdržbové lithium-iontové baterie, umístěné na střeše. Baterie nejsou napájeny pouze dieslovým generátorem, ale také energií zpětně získávanou při brzdění, tj. rekuperaci.

Energie získávaná při vjíždění do zastávky nebo k semaforům se využívá jak k napájení stojícího vozidla, tak také k rozíždění. Tak může hybridní autobus fungovat na zastávkách, při stání i akceleraci čistě elektricky a kvůli tomu prakticky bez emisí, za současného výrazného snížení hlučnosti.

Vlastní pohon kol Citaro G Blue Tec Hybrid přebírají čtyři elektrické motory pohánějící přímo náboj kola na střední a zadní nápravě autobusu. Celkový výkon těchto motorů ve výši 320 kW je pro kloubový autobus dimenzován i při obtížných podmínkách nasazení velmi velkoryse.

Jednou z velkých předností sériového hybridu Citaro je zmenšování (tzv. Downsizing). Místo velkoobjemového sériového šestiválcového motoru se zdvihovým objemem 4,8 litru. Hmotnost motoru je tímto způsobem snížena z přibližně 1000 kg na pouhých 450kg.

Využití největší lithiovo-iontové baterie této výkonnostní kategorie na světě

Kloubový autobus Citaro G Blue Tec Hybrid využívá lithiovo-iontovou baterii takové výkonnostní kategorie, jaká dosud ještě nikdy nebyla k dispozici. Bateriový systém poskytuje 180 kW a se svou hmotností méně než 350kg je poměrně lehký. Zásadní předností v porovnání s běžnými bateriovými systémy jsou vyšší hustota energie spojená s vyšší akumulací kapacity a nízkou vlastní hmotností.

Ostatní výrobci autobusů

Ve vývoji hybridních autobusů nezaostává firma Solaris Bus&Coach. V nabídce jejich produktů lze najít 3 hybridní autobusy. Nejmenší z nich je dvanáctimetrový Solaris Urbino 12 hybrid. Poté následují dva stejně dlouhé autobusy Solaris Urbino 18 hybrid (osmnáctimetrový kloubový autobus) jeden v provedení s paralelním uspořádáním a převodovkou od firmy Allison Transmission, druhý se sériovým uspořádáním a trakčním pohonem od firmy Vossloh Kiepe.

Solaris Urbino 12 hybrid využívá paralelní koncepci pohonu od firmy Eaton. K rekuperaci brzděné energie je použit třífázový elektromotor 44kW při max. 420 Nm, který ukládá energii do čtyř Li-on baterií s kapacitou 3,6kWh a napětím 340V, aby ji pak využil při akceleraci. Baterie jsou nabíjeny výhradně elektromotorem.

Díky elektromotoru je využit menší dieselový motor 6,7l Cummins 162kW (220 HP) s emisní normou EURO5 a max. krouticím momentem 850Nm. Šestistupňová automatická

převodovka, která přenáší sílu obou motorů, je na zadní nápravě. Elektromotor a převodovka jsou montovány spojeně na místě automatické převodovky u konvenčních autobusů. Řídicí systém ideálně mixuje síly obou motorů.

Solaris Urbino 18 hybrid používá osvědčenou koncepci pohonu od firmy Allison Transmission. Pohonnou jednotku tvoří motor Cummins ISB6.7 250H o výkonu 180.5kW, kterému pomáhají dva elektromotory o výkonu 75kW. Energie, získávaná při brzdění vozidla, je shromažďována v NiMH bateriích, montovaných na střeše autobusu.

Výsledky testů prováděné společností TÜV SÜD Auto Cz s.r.o potvrdily snížení spotřeby paliva oproti běžné verzi s dieslovým motorem o 23,8% v cyklu SORT1, 23.4 % v cyklu SORT2 a 22,9% v cyklu SORT3. Úměrně spotřebě paliva poklesne i produkce škodlivých emisí.

Druhý ze série vozidel Solaris Urbino 18 hybrid používá sériovou koncepci konstruovanou firmou Vossloh Kiepe. Vozidlo je vybaveno lithio-fosforovými bateriemi, superkondenzátory a konektory vnějšího nabíjení „plug-in“. Baterie o napětí 384 V, umístěná na střeše autobusu, je chlazená klimatizací. Superkondenzátory jsou rovněž montovány na vozidle. Napětí každého z nich činí 125V. Obě řešení slouží k uložení energie s ohledem na jejich specifickou vlastnost. Baterie se nabíjejí déle, ale mohou uložit více energie. Na druhé straně superkondenzátory jsou schopny v krátkém čase přijmout velké množství elektrické energie, kterou jsou schopny rovněž rychle předat, např. v případě rychlé akcelerace autobusu. Současně jak baterie tak i superkondenzátory mohou ukládat energii vzniklou prací spalovacího motoru, ale také z procesu rekuperace. Tyto zdroje pohánějí trakční motor o výkonu 240kW.

Primárním zdrojem energie je spalovací motor Cummins ISB 6,7 285H o výkonu 210kW. Autobus je také však vybaven systémem vnějšího nabíjení baterií. Konektory typu „plug-in“ firmy Walther o přípustném nabíjecím proudu 63A, poskytují možnost dodávání energie do baterií například na konečné či v depu.

Sériový hybrid Solarisu může projet určitou část trasy pouze díky práci elektrického motoru. Autobus je v té době poháněn energií shromážděnou v bateriích a superkondenzátorech. Navíc může být pohonný systém spojen se zařízením GPS, což umožňuje s neobvyklou přesností stanovit místa, ve kterém má autobus přejít na elektrický pohon, představující nulové emise spalín. Všechno probíhá bez dodatečné práce řidiče – systém automaticky odpojuje spalovací motor a následně jej znovu startuje po projetí stanoveného

úseku. Standardem vybavení vozidla je rovněž funkce start/stop, který zastavuje spalovací motor v době příjezdu, stání a odjezdu Urbino 18 Hybrid ze zastávky. Zdrojem energie jsou v té době baterie a superkondenzátory.

Český hybridní autobus

Výrobce českých hybridních autobusů je společnost SOR Libchavy. Tato společnost v roce 2010 představila hybridní autobus SOR 18 NBH, jež využívá paralelní hybridní pohon společnosti Allison Transmission. Hybridní autobus v akumulátorech shromažďuje energii vzniklou při brzdění a posléze ji využívá při rozjezdu autobusu. Tímto způsobem dochází k značné úspoře paliva v režimech jízdy typických pro linkové autobusy. Další úspora paliva a tudíž i produkce škodlivých emisí je dána tím, že je možné použít motoru Cummins ISB 6,7 E5 250B o výkonu 184 kW při 2300 min^{-1} . Motor dosahuje maximálního točivého momentu 1020 Nm při 1500 min^{-1} . Nejdůležitější prvek hybridního pohonu představuje hybridní převodovka Allison s dvěma integrovanými elektromotory a NiMH baterie o napětí 600 V a maximálním proudu 450 A. Životnost bateriového systému by měla být 6 let.

Hybridní převodovka Allison Hybrid EP patří do skupiny hybridních technologií EVT (Electrically Variable Transmission – elektricky variabilní převodovka) a zahrnuje všechny výhody typické paralelní konstrukce, ale prostřednictvím průběžně měnitelného převodového poměru nabízí vyšší nezávislost mezi spalovacím motorem a pohonným výstupním řetězcem vozidla. To znamená, že spalovací motor může stále běžet v pásmu nejvyšší účinnosti bez ohledu na rychlost či stoupání vozidla.

Hybridní převodovka obsahuje planetová soukolí a spojky, elektronické solenoidy a ventily a dva motorgenerátory, které jsou schopny točivý moment poskytovat nebo přijímat. Během provozu se oba elektrické stroje mohou nezávisle chovat jako motory i generátory v závislosti na rychlosti vozidla, jízdních požadavcích a stavu nabití baterií. Oba elektrické motorgenerátory současně fungují jako spojky s proměnlivým účinkem, které mohou daný prvek planetového systému urychlovat, zpomalovat či držet, a tímto převodovka získává charakter elektricky proměnné převodovky s nekonečným rozsahem převodových poměrů. Toto patentované a unikátní konstrukční uspořádání umožňuje kombinaci výhod paralelní a sériové konfigurace.

3. Emise výfukových plynů

Z hlediska škodlivosti se rozdělují složky výfukových plynů na škodlivé a neškodlivé. Mezi neškodlivé se počítá N_2 , H_2O , CO_2 , O_2 a další. Neškodlivost je pouze relativní, protože přestože CO_2 se uvádí v této kategorii, tak patří k plynům, které vytvářejí skleníkový efekt. Mezi škodlivé patří CO , NO_x , HC a pevné částice.

Sledované emisní složky:

CO – bezbarvý plyn, bez chuti a bez zápachu, lehčí než vzduch, nedráždivý, výbušný; oxid uhelnatý se váže na hemoglobin (krevní barvivo) 200-300 krát rychleji než kyslík, který je tímto způsobem vytěšňován, tím je zabráněno přenosu vzduchu z plic do tkání – je jedovatý. Vzniká při nedokonalém spalování uhlovodíků. V normálních koncentracích v ovzduší poměrně brzo oxiduje na oxid uhličitý CO_2 .

CO_2 – bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu; není jedovatý, ale zvyšuje účinky CO a podílí se na vzniku skleníkového efektu. Emisní norma EURO nelimituje množství CO_2 .

HC – nespálené uhlovodíky, obsahují karcinogenní aromáty, jedovaté aldehydy a nejedovaté alkany a alkeny, plus další složky. Vznikají v průběhu spalování, pokud není dostatečný přísun kyslíku nebo je příliš chudá směs a obsah válce dostatečně neprohoří. Na slunečním světle reagují s oxidy dusíku a vytvářejí látky dráždící sliznici. V létě se tyto látky podílejí na vzniku jedovatého přízemního ozónu.

NO_x – oxidy dusíku mají podobné účinky jako NO , NO_2 , napadají plíce a sliznice. Vznikají v motoru za vysokých teplot a tlaků během hoření při nadbytku kyslíku. Některé oxidy dusíku jsou zdraví škodlivé! Opatření vedoucí ke snižování spotřeby paliva mohou vést ke zvýšení podílu oxidů dusíku ve výfukových plynech, neboť účinnější spalování vede k vyšším teplotám spalování. Často se stává, že „ekologický“ turbodiesel má sice nízké emise CO_2 , ale díky nadměrné produkci NO_x dosahuje pouze emisní normy Euro 4.

SO_2 – štiplavě páchnoucí, bezbarvý, nehořlavý plyn, napadá sliznici a plíce. Podporuje vznik onemocnění dýchacích cest. Používáním paliva s nižším obsahem síry se obsah oxidu siřičitého ve výfukových plynech sníží.

Pb – olovo je jedovatý těžký kov, dnes je palivo u čerpacích stanic běžně k dostání pouze bez olova, mazací vlastnosti olova jsou nahrazeny aditivami.

PM (Saze) – PM (Particulate Matter) částice sazí, způsobují mechanické dráždění, fungují jako nosiče karcinogenů a mutagenů.

Další emisní složky:

N₂ – dusík je nehořlavý, bezbarvý nejdovatý plyn bez zápachu. Dusík je hlavní součástí vzduchu, který dýcháme (78% N₂, 21% O₂, 1% ostatní plyny). Převážná část dusíku se po skončení spalovacího procesu vrací ve výfukových plynech zpět do ovzduší. Malá část reaguje s kyslíkem a vznikají oxidy dusíku NO_x.

O₂ – kyslík je bezbarvý, nejdovatý plyn bez chuti a zápachu. Je nezbytný pro proces spalování.

H₂O – voda ve formě vodní páry, je nasávána spolu se vzduchem

4. Přehled typů hybridních pohonů používaných u autobusů

4.1 Koncepce uspořádání hybridního pohonu

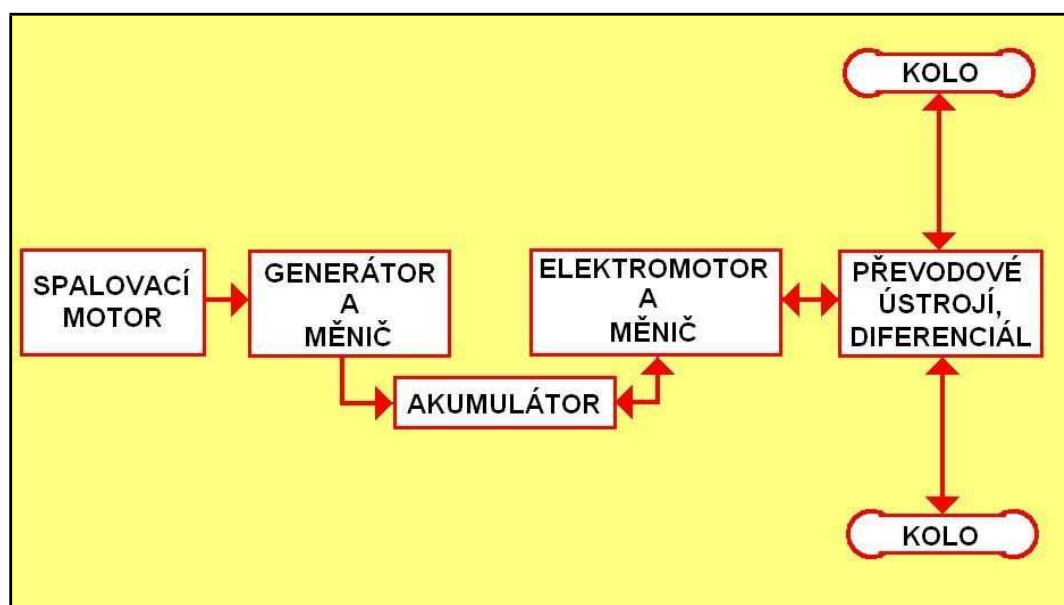
Hybridní pohony představují jednu z cest ke snížení energetické náročnosti a ekologické zátěže vozidlové dopravy. Jedná se o kombinaci spalovacího motoru s akumulátorem energie, kterým může být akumulátorová baterie nebo setrvačnický. V dalším se budeme zabývat pouze systémy s elektrickým akumulátorem energie. Tyto pohony lze v principu rozdělit na sériové, paralelní a kombinované.

4.1.1 Sériová koncepce uspořádání

Spalovací motor a elektromotor jsou zapojeny za sebou. Sériové hybridy se mnohem více podobají elektromobilu, jelikož je spalovací motor používán pouze jako generátor energie, která se přivádí do elektromotoru případně baterií. Sériový pohon je určen především k jízdě na menší vzdálenosti a jízdě po městě. Jakmile je potřeba vysokého výkonu (např. při nutné akceleraci), odebírá pohonný systém energii z generátoru i baterií. Použitím více elektromotorů (např. v kolech vozu) můžeme dosáhnout větší efektivity než u automobilu s jedním elektromotorem. Umístěním elektromotoru do kola nám odpadne použití převodovky a rozvodovky, snížíme tím ztráty a dostaneme další prostor pro

posádku. Ovšem výrazně tím zvýšíme hmotnost neodpružených hmot vozidla. To má špatný vliv na jízdní vlastnosti a životnost podvozku.

Mezi nevýhody sériové koncepce uspořádání patří rychlá jízda na delší trasy, kde je účinnost tohoto systému o 20% až 30% nižší, než u paralelní koncepce pohonu. Hybridní sériový pohon využívá např. Chevrolet Volt. Mezi výhody sériové koncepce uspořádání je možnost spalovacího motoru pracovat v okolí nejvyšší účinnosti a tedy nejnížší spotřeby, jelikož není mechanicky spojený s hnanou nápravou. Sériová koncepce je nejefektivnější ve městě a při nízkých rychlostech s rostoucí rychlostí jeho efektivita klesá.



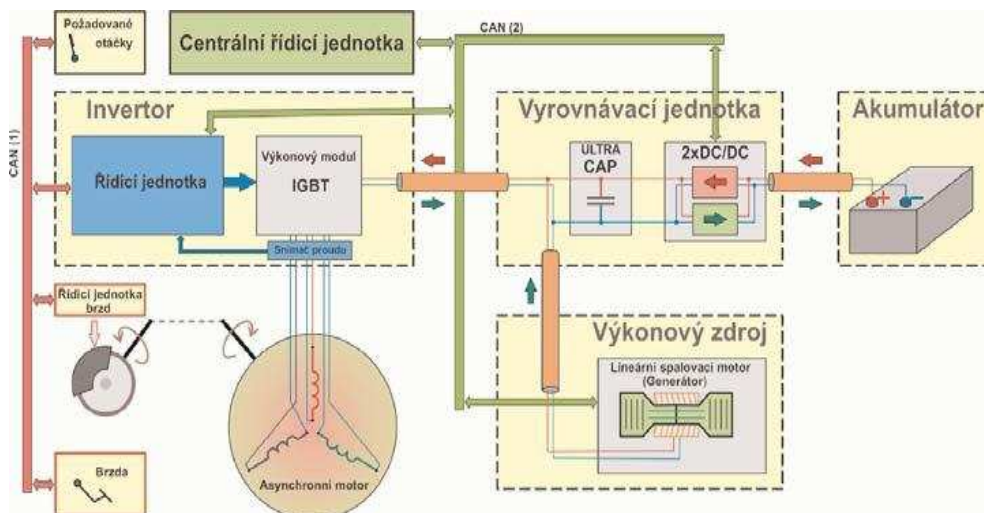
Obr.4.1 – Blokové schéma sériového zapojení (převzato z [4])

Výhody sériových hybridních pohonů :

- nižší spotřeba paliva.
- větší ohleduplnost k životnímu prostředí.
- není nutná složitá elektronika pro řízení chodu motoru.

Nevýhody sériových hybridních pohonů :

- vyšší pořizovací cena vozidla,
- ztráty při přeměnách energie v elektrických strojích
- vyšší hmotnost oproti srovnatelným vozům

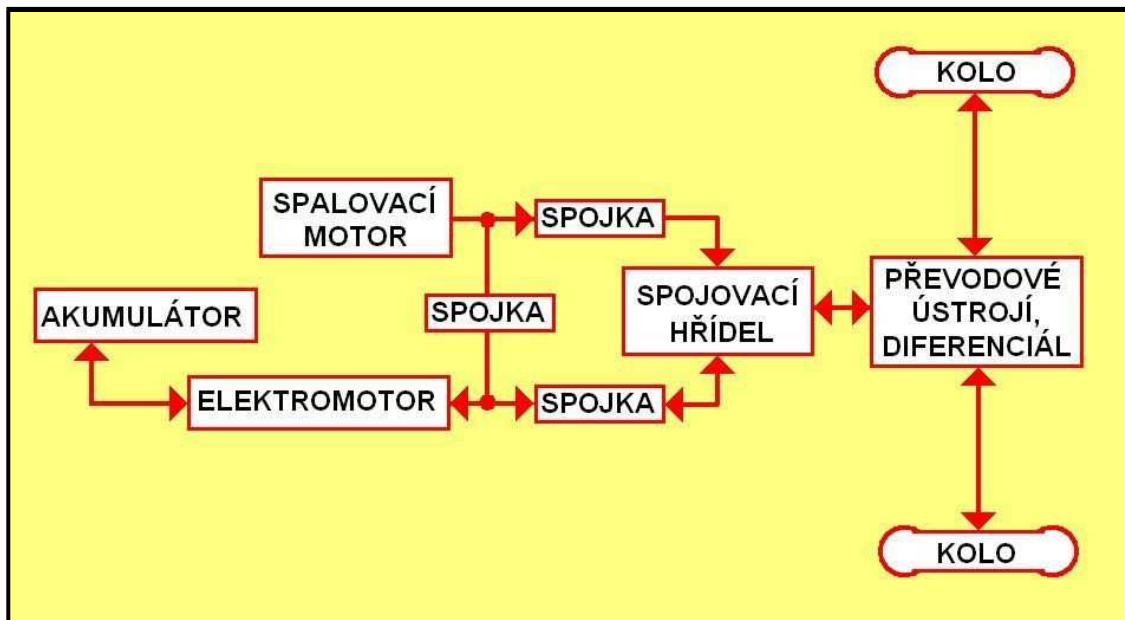


Obr.4.2 Řídicí a výkonové systémy sériového hybridního automobilu (převzato z [1])

4.1.2 Paralelní koncepce uspořádání

Paralelní uspořádání je tvořeno klasickým spalovacím motorem, mechanickou převodovkou a elektrickým strojem, který může pracovat ve dvou režimech, jako generátor a elektromotor. V režimu kdy pracuje jako elektromotor, pomáhá automobilu při rozjezdu nebo při předjíždění. V tomto režimu elektromotor zvyšuje celkový výkon a točivý moment pohonné soustavy. Naopak při brzdění pracuje jako generátor, kdy přeměňuje kinetickou energii na elektrickou, která se následně ukládá do baterií.

Výhodou paralelního uspořádání je dosahování vyšší účinnosti než u sériové koncepce. Nevýhodou je, že spalovací motor je pořád mechanicky spojen s poháněnou nápravou. Jízda čistě na elektrickou energii většinou není možná, jelikož má elektromotor nedostatečný výkon. Elektromotor zde slouží pouze jako pomocný agregát. Velmi častým uspořádáním je umístění elektromotoru mezi převodovkou a spalovacím motorem. Potom elektromotor / generátor plní funkci alternátoru a startéru. Klimatizace a posilovač řízení jsou v tomto případě napájeny přímo elektromotorem, tím se ještě zvýší účinnost spalovacího motoru.



Obr.4.3 – Blokové schéma paralelního zapojení (převzato z [4]).

Výhody paralelních hybridních pohonů :

- nižší spotřeba paliva.
- větší ohleduplnost k životnímu prostředí.
- nedochází k velkému nárůstu hmotnosti.

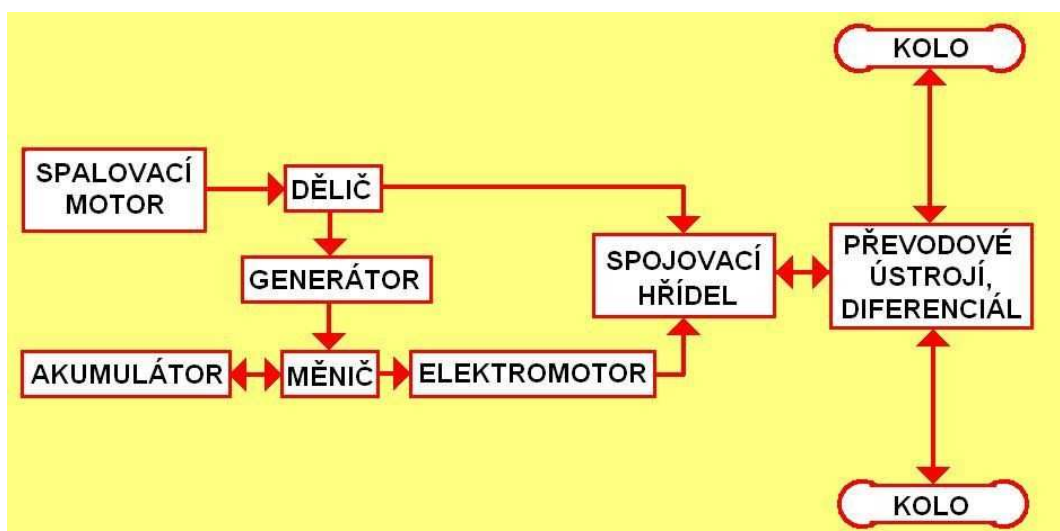
Nevýhody paralelních hybridních pohonů :

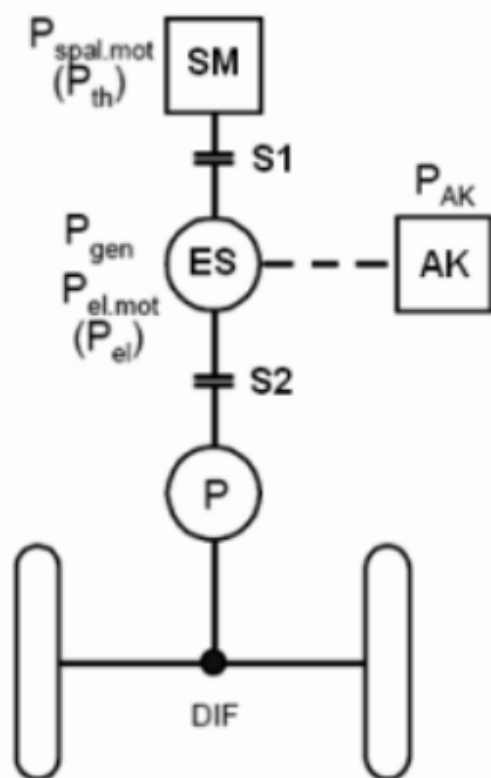
- vyšší pořizovací cena vozidla.
- obtížná synchronizace spalovacího motoru a elektromotoru.

4.1.3 Kombinovaná koncepce uspořádání

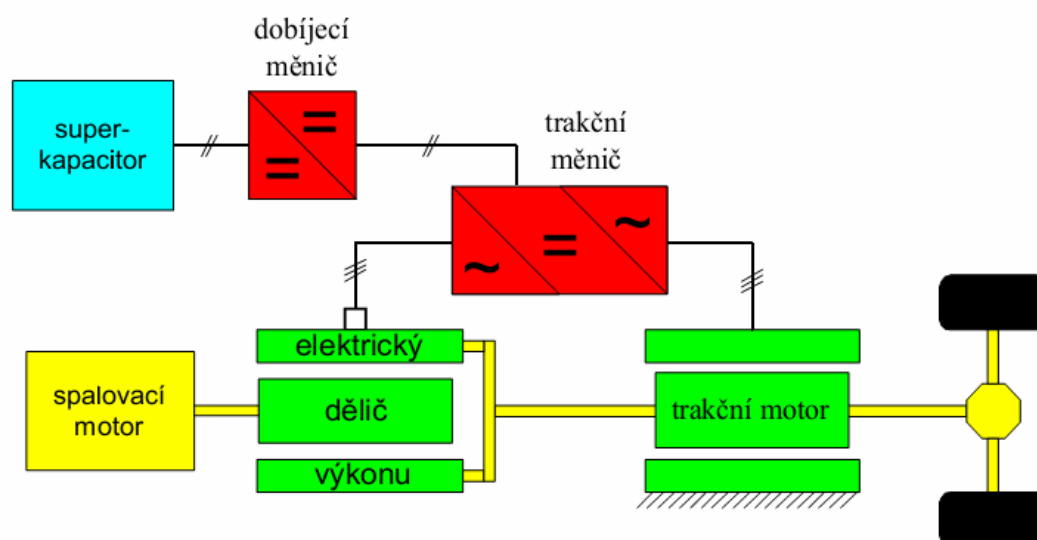
Kombinovanou koncepci uspořádání pohonu můžeme rozdělit do dvou skupin: přepínatelné pohony a pohony s dělením výkonu. Přepínatelné pohony mohou pracovat jako sériové i paralelní koncepce. Vozidlo v tomto uspořádání je vybaveno dvěma spojkami – první spojka S1 (**Obr.4.4**) spojuje spalovací motor (SM) se stejnosměrným elektrickým strojem (ES), druhá spojka S2 spojuje elektrický stroj s převodovkou (P). Na

krátké vzdálenosti a rovnoměrnou jízdu cca do 50 km/h např. jízda ve městě, je automobil poháněn pouze elektromotorem, který čerpá energii z akumulátorů (AK). Spalovací motor je vypnutý, spojka S1 rozpojena a S2 sepnuta. Jakmile dojde k vybití akumulátorů, nebo když potřebujeme zvýšit rychlost, dojde k sepnutí spojky S1 a nastartování spalovacího motoru, který se stane primárním pohonem automobilu. Při potřebě maximálního výkonu, např. při předjíždění jsou sepnuty obě spojky a dochází k přenosu největšího točivého momentu převodovkou. Při přebytku kinetické energie (jízda z kopce, brzdění) dojde k rozpojení spojky S1 a vypnutí spalovacího motoru. Generátor přeměňuje kinetickou energii vozidla na elektrickou a dobíjí akumulátory. Po zastavení vozidla se vypnou oba motory a vozidlo zůstane v tzv. pohotovostním režimu.





Obr.4.4 – Koncepte uspořádání hybridní pohonu (převzato z [5])



Obr.4.5 - Pohon s elektrickým děličem výkonu (převzato z [6])

5 Výpočet vlastního modelu

5.1 Jízdní model při jízdě po rovině

K výpočtům jsem využil hodnot vozidla Iveco Citelis 18 M Hybrid. Toto vozidlo mi slouží pouze jako příklad pro moji práci.

Motor je třeba zvolit dostatečně výkonný pro zachování dobrých jízdních vlastností vozidla, především stoupavosti, která u našeho modelu činí maximálního stoupání

$\alpha_{\max} = 5 [^\circ]$ a to při maximální přípustné hmotnosti 26000kg. Zároveň jsem stanovil jako rychlost jízdy do tohoto stoupání $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Maximální rychlost vozidla je $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

➤ Výpočet maximálních otáček vozidlového kola n_{\max} :

Maximální rychlost vozidla $v_{\max} = 70 \quad [\text{km} \cdot \text{h}^{-1}]$

Dynamický poloměr kola $r_d = 0,465 \quad [\text{m}]$

Celkový převodový poměr $i_c = 1 \quad [-]$

$$v = 2\pi * \frac{n_m * r_d}{60 * i_c} \quad (1)$$

Úpravou vzorce (1) vyjádříme otáčky motoru n_m

$$v = 2\pi * \frac{n_m * r_d}{60 * i_c} \Rightarrow n_m = \frac{30 * v * i_c}{\pi * r_d} \quad [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2)$$

Po dosazení maximální rychlosti V_{\max} do upraveného vzorce dostaneme maximální otáčky motoru $n_{m \max}$:

$$n_{m \max} = \frac{30 * v * i_c}{\pi * r_d} = \frac{30 * \frac{70}{3,6} * 1}{\pi * 0,465} = 399,5 [\text{ot} / \text{min}]$$

➤ Výpočet otáček vozidlového kola n_m při jízdě do maximálního stoupání α_{\max} požadovanou rychlostí v :

Požadovaná rychlost vozidla $v = 50 \quad [\text{km} \cdot \text{h}^{-1}]$

Dynamický poloměr kola $r_d = 0,465 \quad [\text{m}]$

Celkový převodový poměr $i_c = 1 \quad [-]$

Dosazením požadované rychlosti do upraveného vzorce (2) dostaneme:

$$n_m = \frac{30 * v * i_c}{\pi * r_d} = \frac{30 * \frac{50}{3,6} * 1}{\pi * 0,465} = 285,2 \text{ [ot/min]}$$

V obou případech otáčky motoru odpovídají rychlosti otáčení vozidlového kola. Tento výpočet slouží k určení převodových poměrů tak, aby pohon mohl pracovat v optimálním režimu.

➤ Celkový jízdní odpor F při jízdě rychlostí $v_{\max} = 50 \text{ [km/h]}$ po rovině:

Obecný výpočet celkového jízdního odporu se skládá ze součtů odporu valení, odporu do stoupání a odporu vzduchu.

Výpočet čelní plochy autobusu $S_{\check{c}}$:

Šířka autobusu $\check{s} = 2,500 \text{ [m]}$,

Výška autobusu $h = 3,391 \text{ [m]}$.

$$S_{\check{c}} = 0,8 \times \check{s} \times h = 0,8 * 2,5 * 3,391 = 6,782 \text{ [m}^2\text{]} \quad (3)$$

Výpočet celkového jízdního odporu

Celková hmotnost vozidla $m_c = 26\,000 \text{ [kg]}$

Maximální rychlost vozidla $v_{\max} = 50 \text{ [km.h}^{-1}\text{]} = 13,89 \text{ [m/s]}$

Úhel stoupání $\alpha = 0 \text{ [}^\circ\text{]}$

Gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$

Součinitel valivého odporu $f = 0,01 \text{ [-]}$

Součinitel odporu vzduchu $c_x = 0,65 \text{ [-]}$

Velikost čelní plochy autobusu $S_{\check{c}} = 6,782 \text{ [m}^2\text{]}$

Hodnotu součinitele odporu vzduchu volím jako střední hodnotu z běžně užívaného rozmezí pro autobusy $c_x = 0,5 - 0,8$. Součinitel valivého odporu volím hodnotu $f = 0,01$.

Výpočet odporu vzduchu:

$$O_v = \frac{\rho_a}{2} c_x S_{\check{c}} v_r^2 = \frac{1,29}{2} * 0,65 * 6,782 * 13,89^2 = 548,57 \text{ [N]} \quad (4)$$

Výpočet valivého odporu:

$$O_f = G_v f_r = m g f_r = 26000 * 9,81 * 0,01 = 2550,6 \text{ [N]} = 2,5506 \text{ [kN]} \quad (5)$$

Celkový jízdní odpor je roven:

$$F = \sum_i O_i = O_v + O_f = 548,57 + 2550,6 = 3099,17[N] = 3,09917[kN] \quad (6)$$

➤ Celkový jízdní odpor F přijíždě požadovanou rychlostí v do maximálního stoupání α_{\max} :

Celková hmotnost vozidla	$m_c = 26\,000$	[kg]
Požadovaná rychlost vozidla	$v = 40,5$	$[km.h^{-1}] = 11,25$ [m/s]
Úhel stoupání	$\alpha_{\max} = 5$	[°]
Gravitační zrychlení	$g = 9,81$	$[m.s^{-2}]$
Součinitel valivého odporu	$f = 0,01$	[-]
Součinitel odporu vzduchu	$c_x = 0,65$	[-]
Velikost čelní plochy autobusu	$S_c = 6,782$	$[m^2]$

Výpočet odporu vzduchu:

$$O_v = \frac{\rho_a}{2} c_x S_c v^2 = \frac{1,29}{2} * 0,65 * 6,782 * 11,25^2 = 359,86[N]$$

Výpočet valivého odporu:

$$O_f = G_v f_r = m g f_r = 26000 * 9,81 * 0,01 = 2550,6[N] = 2,5506[kN]$$

Výpočet odporu stoupání:

$$O_s = G \sin \alpha = m g \sin \alpha = 26 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot \sin 5^\circ = 22230[N] = 22,230[kN] \quad (7)$$

Celkový jízdní odpor:

$$F = \sum_i O_i = O_v + O_f + O_s = 359,86 + 2550,6 + 22230 = 25140[N] = 25,140[kN] \quad (8)$$

➤ Výpočet výkonu motoru P_{\max} :

Celkový jízdní odpor	$F = 25140$	[N]
----------------------	-------------	-----

Rychlost vozidla	$V = 40,5$	$[km.h^{-1}]$
------------------	------------	---------------

	$v \approx 11,25$	$[m.s^{-1}]$
--	-------------------	--------------

Mechanická účinnost převodového ústrojí	$\eta_t = 0,9$	[-]
---	----------------	-----

Účinnost pohonných elektromotorů	$\eta_m = 0,9$	[-]
----------------------------------	----------------	-----

Účinnost měniče a superkapacitoru	$\eta_{sc} = 0,89$	[-]
-----------------------------------	--------------------	-----

$$F \cdot v = P_{\max} \cdot \eta_m \cdot \eta_t \cdot \eta_{sc} \quad (9)$$

Úpravou vzorce (9) vyjádříme maximální výkon motoru P_{\max}

$$F \cdot v = P_{\max} \cdot \eta_m \cdot \eta_t \cdot \eta_{sc}$$

$$\Rightarrow P_{\max} = \frac{F \cdot v}{\eta_m \cdot \eta_t \cdot \eta_{sc}} = \frac{25140 \cdot 11,25}{0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,89} = 392,322[\text{W}] = 392,322[\text{kW}] \quad (10)$$

5.2 Energetická bilance uvažovaného jízdního cyklu

Pro energetickou bilanci a další výpočty jsem si stanovil jízdní cyklus o 1 zastávkách po 950 metrech. Pro zjednodušení nejsou uvažovány křižovatky. Předpokládám, že autobus bude plně zatížen po celou dobu jízdy. Dále v zastávkách bude stát po dobu druhé minuty. Pro převod mechanické energie na elektrickou se udává účinnost mezi 70 a 80%.

Vstupní hodnoty pro výpočet energetické bilance

	Irisbus Citelis 18m Hybrid
Délka jednoho úseku	$l_0 = 950 \text{ [m]}$
Doba stání v zastávce	$t_s = 2[\text{min}]$
Uvažovaná hmotnost	$m_c = 26000 \text{ [kg]}$
Úhel stoupání	$\alpha = 0 [^\circ]$
Uvažovaná účinnost	$\eta = 0,75 [-]$
Uvažované zrychlení	$a = 0,64 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$
Uvažované zpomalení	$a = 2 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$
Maximální rychlost	$V_1 = 50 \text{ [km.h}^{-1}\text{]}$ $= 13,89 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$
Počáteční rychlost	$V_0 = 0 \text{ [km.h}^{-1}\text{]}$
Průměrná spotřeba nafty	$\Phi = 20,53 / 100 \text{ [l.km}^{-1}\text{]}$
Výhřevnost mot. Nafty	$H = 42 \text{ [MJ.kg}^{-1}\text{]}$
Hustota nafty	$\rho = 0,83 \text{ [kg.dm}^{-3}\text{]}$
Šířka autobusu	$\check{s} = 2,5 \text{ [m]}$
Výška autobusu	$h = 3,185 \text{ [m]}$
Velikost čelní plochy	$S_c = 6,782 \text{ [m}^2\text{]}$
Součinitel odporu vzduchu	$c_x = 0,65 [-]$
Tíhové zrychlení	$g = 9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$

Doba brzdění:

$$v = a \cdot t \text{ [s]} \quad (11)$$

$$v = a \cdot t \Rightarrow t = \frac{v}{a} = \frac{13,89}{2} = 6,945 \text{ [s]}$$

Dráha ujetá během brzdění:

$$s = \frac{1}{2} a t^2 [m] \quad (12)$$

$$s = \frac{1}{2} * 2 * 6,945^2 = 48,23[m]$$

Kinetická energie rozjetého autobusu:

$$E_k = \frac{1}{2} * m * v^2 [J] \quad (13)$$

$$E_k = \frac{1}{2} * 26000 * 13,89^2 = 2508117 [J]$$

Velikost jízdních odporů rozjetého autobusu:

$$F = \sum_i O_i = O_v + O_f = \frac{\rho_a}{2} c_x S_c v_r^2 + m g f_r =$$
$$= \frac{1,29}{2} * 0,65 * 6,782 * 13,89^2 + 26000 * 9,81 * 0,01 = 3099[N] = 3,099[kN]$$

vyjádřeno jako energie (práce)

$$E_o = F \cdot s [J] \quad (14)$$

$$E_o = 3099 * 48,23 = 149465 [J]$$

Výkon dobitý během brzdění:

$$P_B = \frac{E_k - E_o}{t} \eta [W] \quad (15)$$

$$P_B = \frac{E_k - E_o}{t} \eta = \frac{2508117 - 149465}{6,945} * 0,75 = 254714 [W]$$

Výkon potřebný pro rozjezd autobusu:

- Velikost jízdních odporů rozjíždějícího se autobusu na rovině F

$$F = \sum_i O_i = O_v + O_f = \frac{\rho_a}{2} c_x S_c v_r^2 + m g f_r =$$
$$= \frac{1,29}{2} * 0,65 * 6,782 * 13,89^2 + 26000 * 9,81 * 0,01 = 3099[N] = 3,099[kN]$$

- Stálá síla působící během zrychlení F_{ZR} :

$$F_{ZR} = m * a [N] \quad (16)$$

$$F_{ZR} = 26000 * 0,64 = 16640[N]$$

- Výsledná odpor F_V :

$$F_V = F + F_{ZR} \text{ [N]} \quad (17)$$

$$F_V = F + F_{ZR} = 3099 + 16640 = 23899 \text{ [N]}$$

- Potřebná energie (vykonaná práce) pro rozjezd autobusu E_R :

$$E_R = F_V \cdot s \text{ [J]} \quad (18)$$

$$E_R = 23899 \cdot 48,23 = 1152648 \text{ [J]}$$

- Potřebný výkon pro rozjezd autobusu P_R :

$$P_R = \frac{E_R}{t \cdot \eta_m \cdot \eta_t \cdot \eta_{sc}} \text{ [W]} \quad (19)$$

$$P_R = \frac{E_R}{t \cdot \eta_m \cdot \eta_t \cdot \eta_{sc}} = \frac{1152648}{6,945 \cdot 0,91 \cdot 0,9 \cdot 0,89} = 227693 \text{ [W]} = 227,693 \text{ [kW]}$$

Výkon získaný během stání v zastávce P_Z :

$$E = \Phi \cdot \rho \cdot H \text{ [MJ.100km}^{-1}\text{]} \quad (20)$$

$$E = 20,53 \cdot 0,83 \cdot 42 = 715,67 \text{ [MJ.100km}^{-1}\text{]} = 7,1567 \text{ [MJ.km}^{-1}\text{]}$$

s využitím přepočtu na motohodinu

$$1 \text{ [mh]} = 25 \text{ [km]}$$

$$E_{mh} = 25 \cdot 7,1567 = 178,9 \text{ [MJ.mh}^{-1}\text{]} \quad (21)$$

přepočítáno na dobu stání v zastávce

$$1 \text{ [mh]} = 60 \text{ [mm]}$$

$$E_{mm} = \frac{E_{mh}}{60} \text{ [J / mm]} \quad (22)$$

$$E_{mm} = \frac{178,9}{60} = 2,982 \text{ [MJ / mm]}$$

z toho získaný výkon P_Z

$$P_z = \frac{E_{mm}}{60} \cdot \eta \text{ [W]} \quad (23)$$

$$P_z = \frac{E_{mm}}{60} \cdot \eta = \frac{2982000}{60} \cdot 0,75 = 37275 \text{ [W]}$$

5.3 Popis výpočtového modelu pro reálnou jízdu

Několika autory byly provedeny výpočty pro zjednodušený jízdní cyklus. Tento

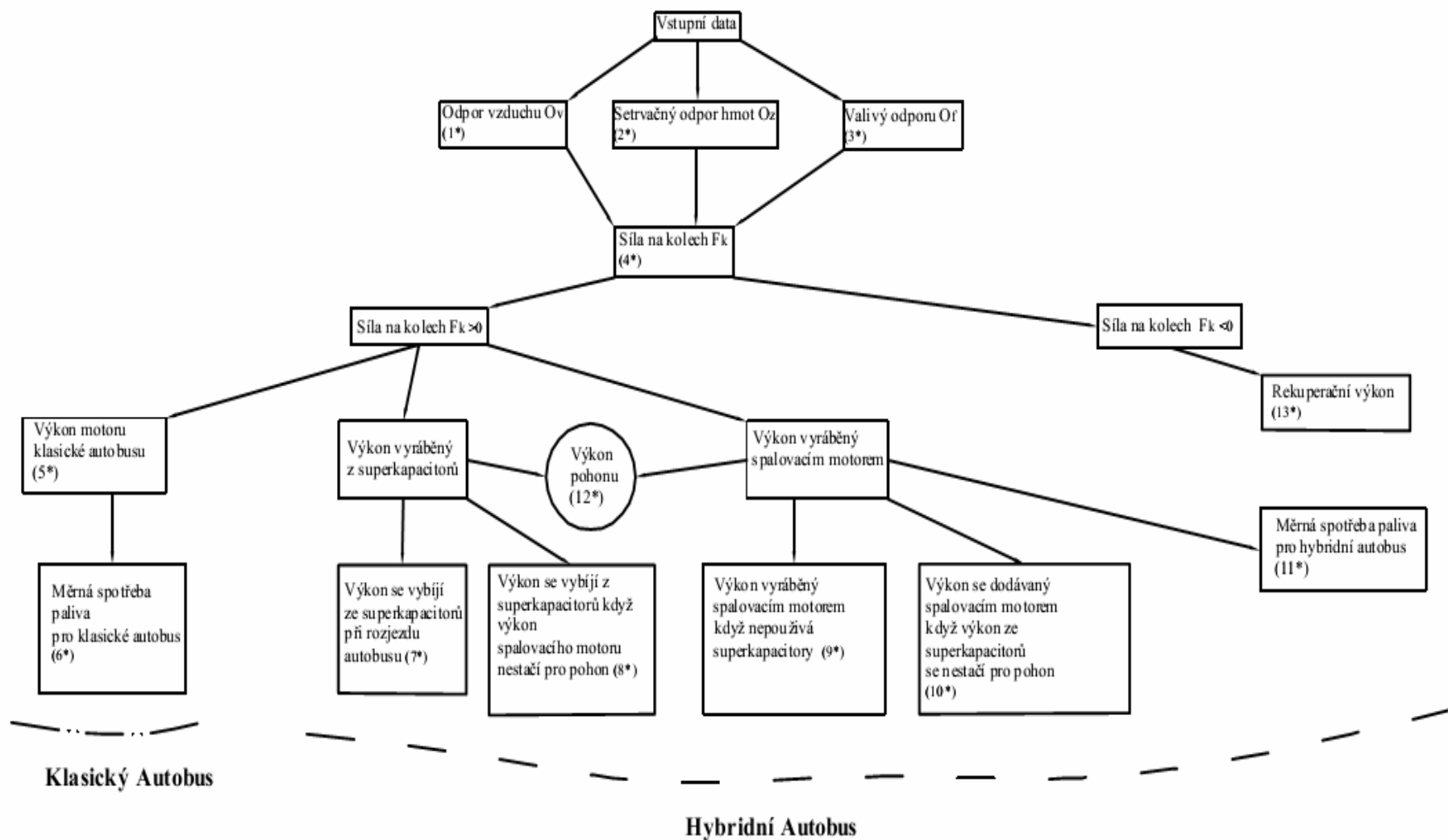
cyklus obsahoval rovnoměrné zrychlení, jízdu ustálenou rychlostí, plynulé brzdění a stání v zastávce [7]. Protože jsou tyto jízdní cykly velmi zjednodušené jsem vytvořil výpočtový model, který je určen k vyhodnocení reálné jízdy.

Podle provedených výpočtů je návrh pohonu limitován jízdou požadovanou rychlostí do maximálního stoupání. Z výše uvedené energetické bilance je zřejmé, že možnost získat zpět více než 50% energie její rekuperací při brzdění. Skutečná hodnota úspor již záleží na reálném jízdním cyklu a samotného provedení a řízení hybridního pohonu.

Výpočet požadovaného výkonu na skutečném cyklu pro každou sekundu jízdy:

Zadané parametry hybridního autobusu:

- Celková hmotnost vozidla při plném obsazení $m=26000\text{kg}$
- Součinitel odporu vzduchu $c_x=0,65$
- Součinitel valivého odporu $f=0,01$
- Čelní plocha vozidla $S_{\check{c}}=6,782\text{ m}^2$
- Součinitel vlivu rotačních částí $\nu = 1,05$
- Mechanická účinnost převodového ústrojí $\eta_t= 0,9$ [-]
- Účinnost pohonných elektromotorů $\eta_m= 0,90$ [-]
- Účinnost měniče a superkapacitoru $\eta_{sc}= 0,89$ [-]
- Maximální výkon motoru 220 [kW]
- Maximální výkon generátoru 200 [kW]
- Maximální výkon elektromotoru 200 [kW]
- Maximální výkon superkapacitorů 200 [kW]
- Celková účinnost motoru $\eta_c = 0,3$
- Výhřevnost paliva $H_u=42\text{ MJ/kg}$
- Hustota nafty $\rho_n = 830\text{kg} / \text{m}^3$
- Hustota vzduchu $\rho_a = 1,29[\text{kg} / \text{m}^3]$
- Koncepce uspořádání hybridního pohonu: Paralelní koncepce uspořádání



Obr.5.1: Schéma výpočtu.

Výpočet odporu vzduchu (1*):

$$O_v = \frac{\rho_a}{2} c_x S_c v^2 [N]$$

Výpočet setrvačného odporu hmot (2*):

$$O_z = v m a_x [N] \quad (24)$$

Výpočet valivého odporu (3*):

$$O_f = G_v f_r = m g f_r = 26000 * 9.81 * 0.01 = 2550,6 [N] = 2,5506 [kN]$$

Síla na kolech F_k (4*):

$$F_k = \sum_i O_i = O_v + O_z + O_f [N]$$

❖ Když $F_k > 0$

Výkon motoru klasické autobusu (5*):

$$P_k = \frac{F_k * v}{\eta_t} [W]$$

Měrná spotřeba paliva pro klasické autobus (6*):

$$m_{pe} = \frac{P_{spalovací motor z klasické autobusu}}{\eta_c * H_u * \rho_n} [g / sekundu]$$

Výkon se vybíjí ze superkapacitorů při rozjezdu autobusu (7*):

$$P_k = \frac{F_k * v}{\eta_m * \eta_{sc} * \eta_t} [W]$$

Výkon se vybíjí z superkapacitorů když výkon spalovacího motoru nestačí pro pohon (8*):

$$\frac{P_{superkapacitorů}}{\eta_m * \eta_{sc} * \eta_t} + \frac{P_{spalovací motor}}{\eta_t} = P_k = F_k * v [W] \{ P_k \text{ je výkon na kolech} \}$$

$$\Rightarrow P_{superkapacitorů} = (P_k - \frac{P_{spalovací motor}}{\eta_t}) * \eta_m * \eta_{sc} * \eta_t [W]$$

$$\{ \text{Poznámka: } \frac{P_{Rekuperační}}{P_{Vybití}} = \frac{1}{(\eta_m * \eta_{sc} * \eta_t)^2} = \frac{1}{(0,9 * 0,89 * 0,9)^2} = 1,924 \}.$$

Výkon vyráběný spalovacím motorem když nepoužívá superkapacity (9*):

$$P_{spalovací motor} = \frac{P_k}{\eta_t} [W]$$

Výkon se dodávaný spalovacím motorem když výkon ze superkapacitorů se nestačí pro pohon (10*):

$$\frac{P_{\text{superkapacitorů}}}{\eta_m * \eta_{sc} * \eta_t} + \frac{P_{\text{spalovací motor}}}{\eta_t} = P_k = F_k * v [W]$$

$$\Rightarrow P_{\text{spalovací motor}} = (P_k - \frac{P_{\text{superkapacitorů}}}{\eta_m * \eta_{sc} * \eta_t}) * \eta_t [W]$$

Měrná spotřeba paliva pro hybridní autobus (11*):

$$m_{pe} = \frac{P_{\text{spalovací motor z hybridní autobusu}}}{\eta_c * H_u * \rho_n} [g / sekundu]$$

Výkon pohonu (12*):

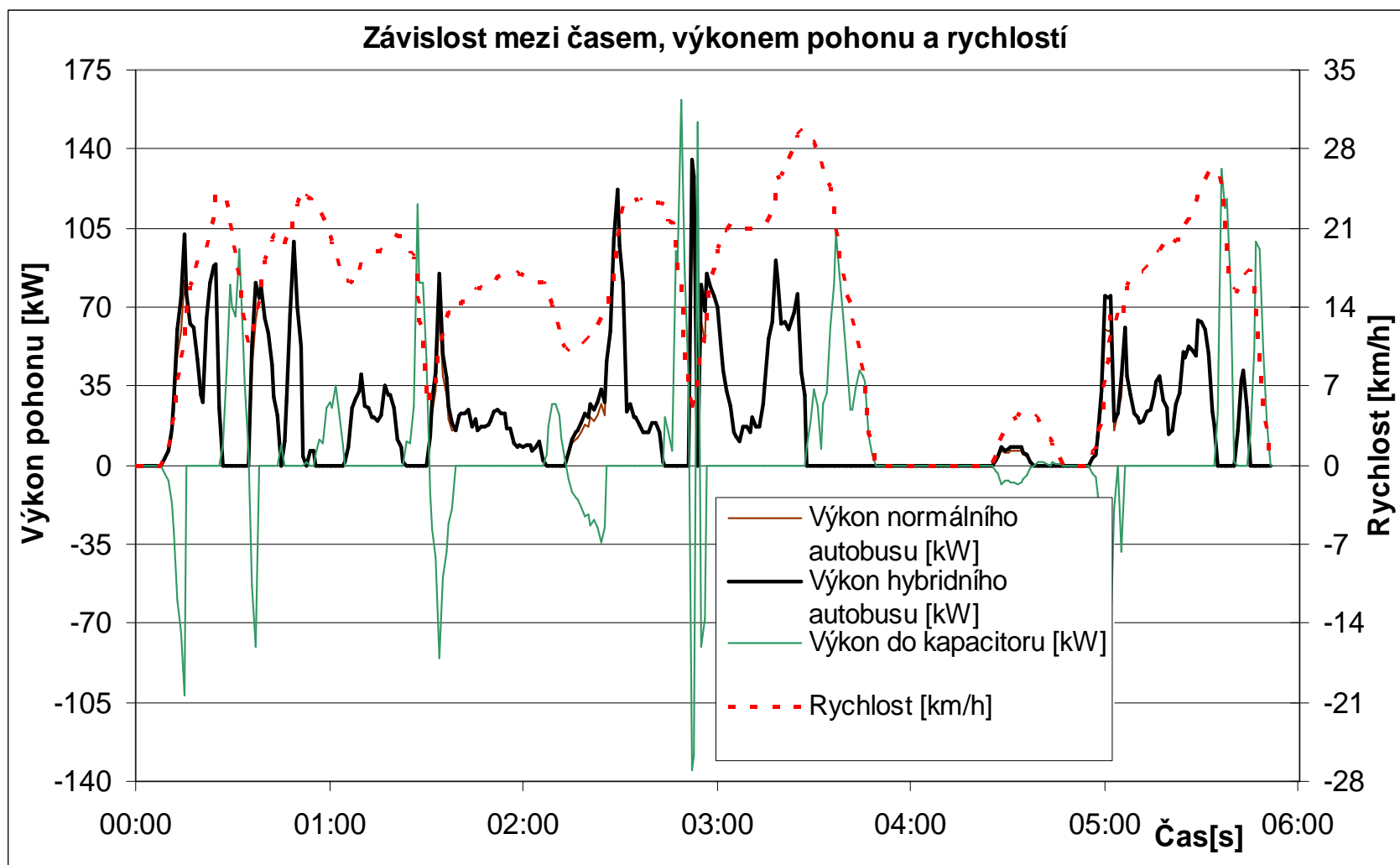
$$P_{\text{pohon}} = P_{\text{spalovací motor}} + P_{\text{superkapacitorů}} [W]$$

❖ Když $F_k < 0$

Rekuperační výkon (13*):

$$\bar{P}_k = \frac{F_k * v}{\eta_{sc} * \eta_m} [W]$$

5.3.1 Klidná městská jízda



Graf 5.1 Závislost mezi časem, výkonem pohonu a rychlostí na klidné městě.

Maximální výkon pohonu hybridního autobusu $P = 135$ [kW] v čase 02:52.

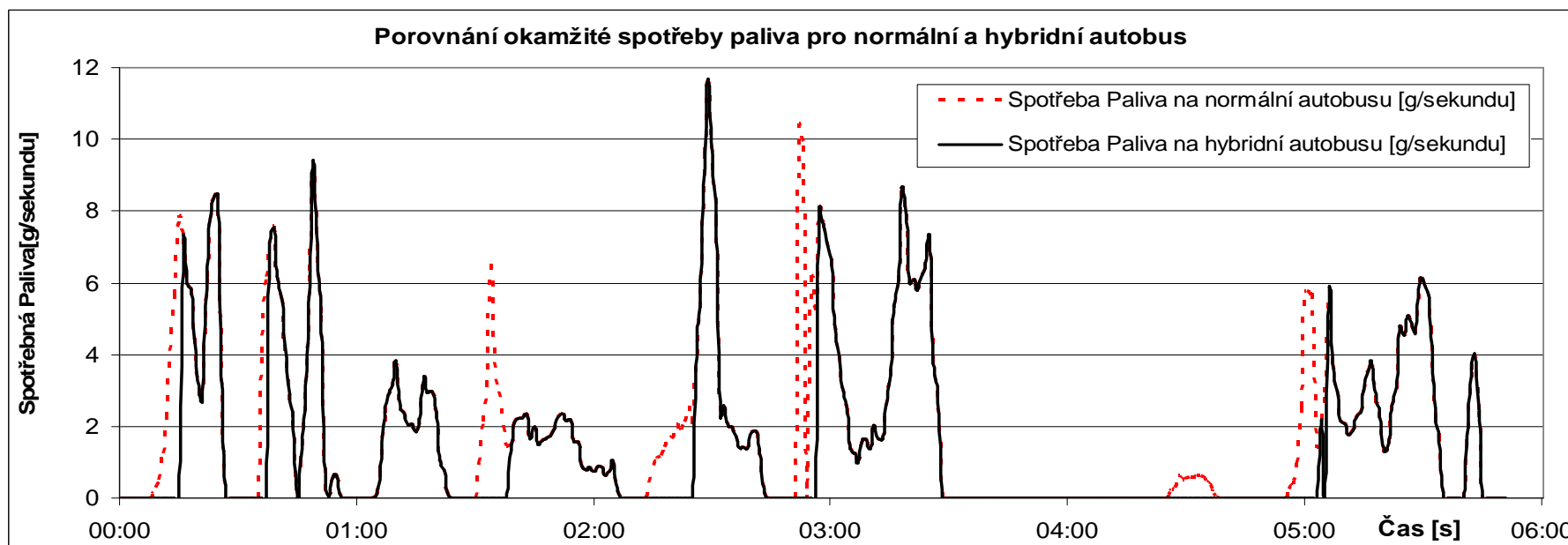
Maximální výkon -135 [kW] je ze superkapacitoru čerpán v čase 02:52. Napájení výkon superkapacitoru je zaporné, superkapacitor se vybíjí.

Množství energie využité při brždění k rekuperaci, které bylo následně vloženo do kapacitu je 1769 [kJ]. V průběhu jízdy bylo k pohonu na kola autobusu přivedeno 3403 [kJ]. Poměr mezi oběma energiemi odpovídá poměru 1,92 dle vztahu

$$\frac{P_{\text{Rekupační}}}{P_{\text{Vybíjení}}} = \frac{1}{(\eta_m * \eta_{sc} * \eta_t)^2} = \frac{1}{(0,9 * 0,89 * 0,9)^2} = 1,924$$

Autobus může jet bez pomoci spalovacího motoru až do rychlosti 13,5 km/hod v klidném městě.

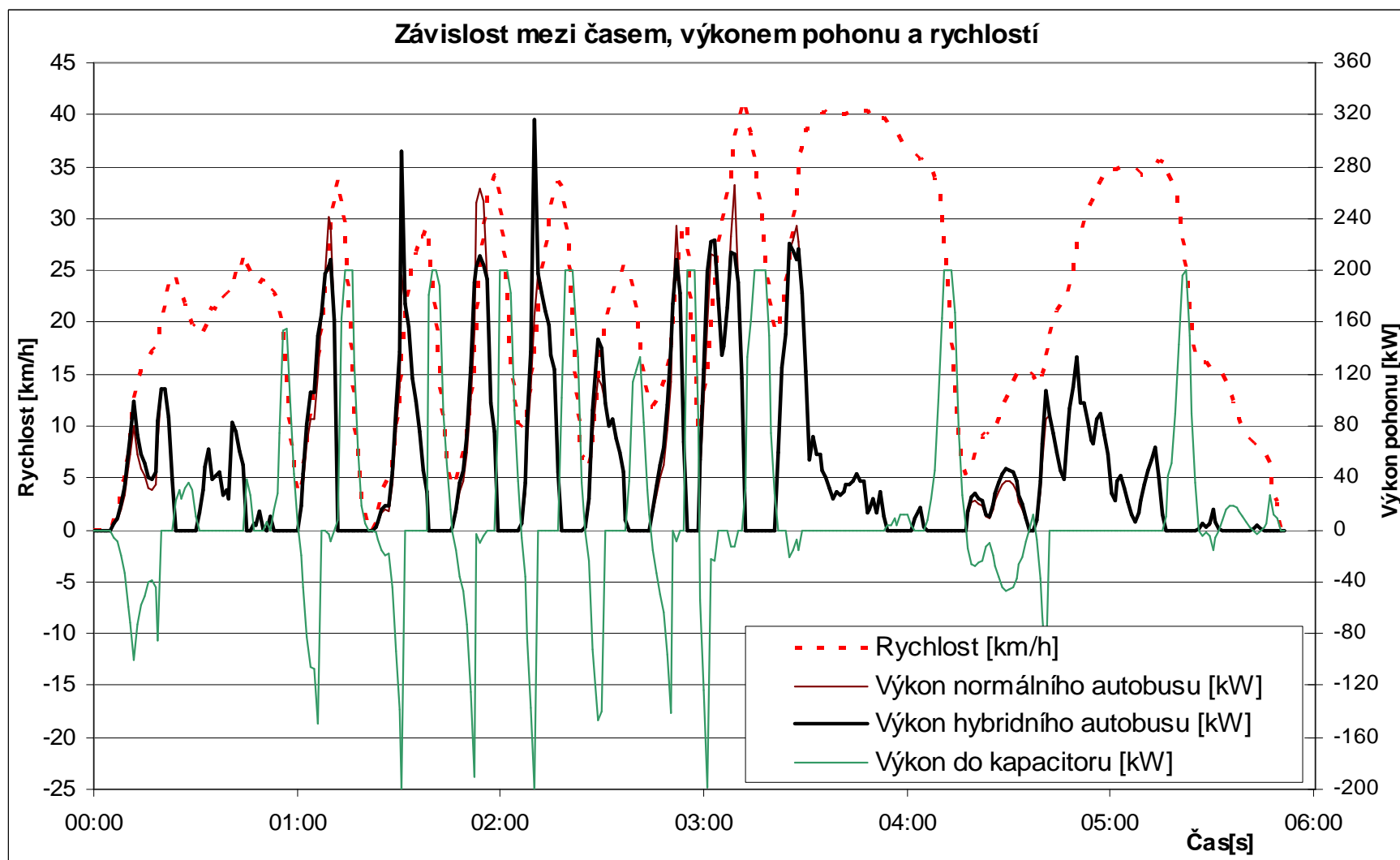
Maximální spotřebná paliva pro hybridní autobus je 11,7 [g/sekundu] na v čase 2:29.



Graf 5.2 Závislost mezi časem a spotřebnou palivou na hibrdní autobusu a normální autobusu na klidné městě.

Procentní úsporo palivo je 20,6% na klidné městě.

5.3.2 Agresivní městská jízda



Graf 5.3 Závislost mezi časem, výkonem pohonu a rychlostí na agresivní městě

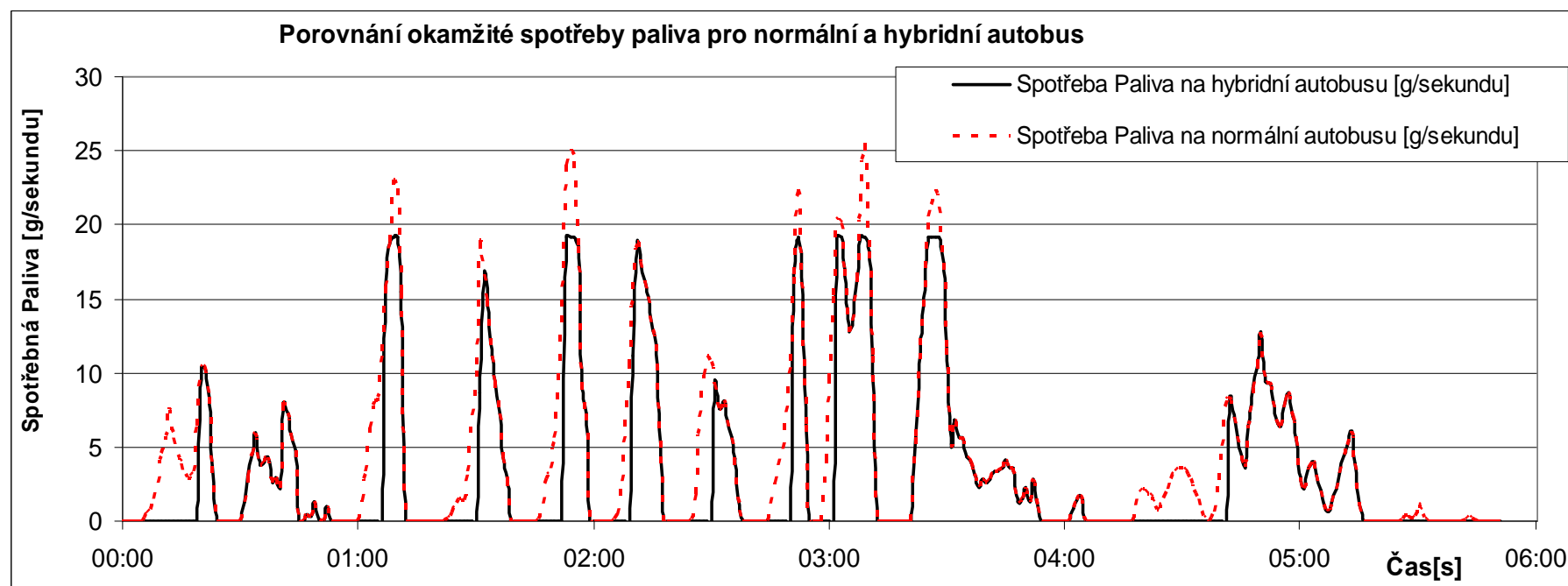
Maximální výkon pohonu hybridního autobusu je $P = 316$ [kW] v čase 02:10.

Maximální výkon -200 [kW] je ze superkapacitoru čerpán v časech 01:31 a 02:10.

Množství energie využité při brždění k rekuperaci, které bylo následně vloženo do kapacitu je 9846 [kJ]. V průběhu jízdy bylo k pohonu na kola autobusu přivedeno 5118 [kJ].

Autobus může jet bez pomoci spalovacího motoru až do rychlosti 18,5 km/hod na agresivní městě.

Maximální spotřeba paliva pro hybridní autobus je 19,1 [g/sekundu] v časech 01:09, 01:10, 01:53, 01:54, 01:55, 02:52, 03:03, 03:08, 03:09, 03:25, 03:26, 03:27



Graf 5.4 Závislost mezi časem a spotřebnou palivou na hibriní autobusu a normální autobusu na agresivní městě.

Procentní úsporo palivo je 25,9% na agresivní městě.

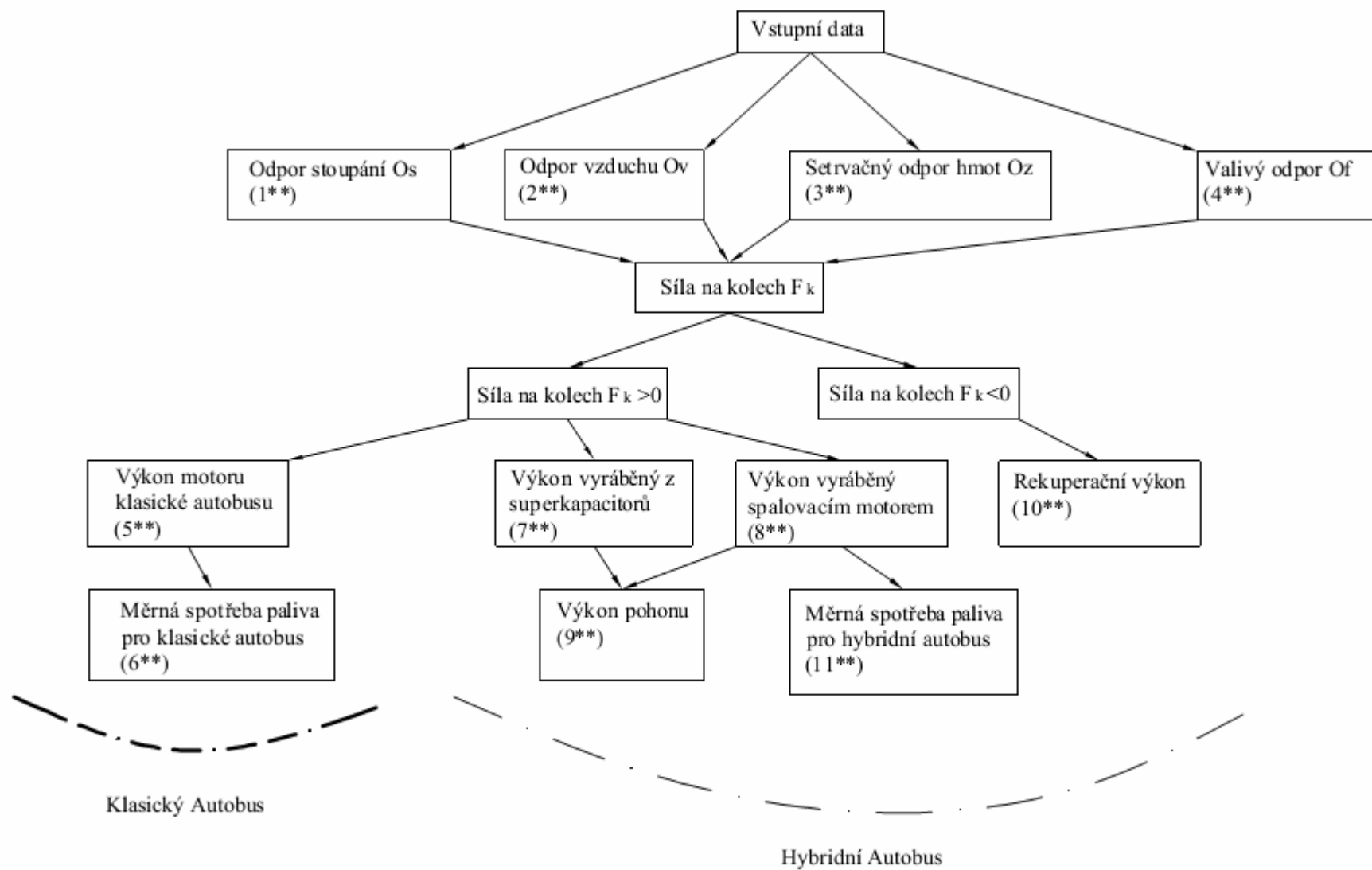
5.4 Jízdní model při reálně městské jízdě s převýšením

Protože měření hmotnosti na autobusu když autobus pohybování je velmi obtížné. Tak předpokládám, že když autobus jede rychle. Tak jeho hmotnost je asi 70% hmotnostní autobus, když autobus jede pomalu.

Dále předpokládám, že hmotnost na všechny autobusu a jejich základní rozměry jsou stejné.

Zadané parametry autobusu:

- Hmotnost autobusu $m = 9030 \text{ kg}$
- Součinitel odporu vzduchu $c_x = 0,65$
- Součinitel valivého odporu $f = 0,01$
- Čelní plocha vozidla $S_{\check{c}} = 5,959 \text{ m}^2$
- Součinitel vlivu rotačních částí $\nu = 1,05$
- Mechanická účinnost převodového ústrojí $\eta_t = 0,9 [-]$
- Celková účinnost motoru $\eta_c = 0,3 [-]$
- Výhřevnost paliva $H_u = 42 \text{ MJ/kg}$
- Hustota nafty $\rho_n = 830 \text{ kg / m}^3$
- Hustota vzduchu $\rho_a = 1,29 [\text{kg / m}^3]$
- Koncepce uspořádání hybridního pohonu: Paralelní koncepce uspořádání



Obr.5.2: Schéma výpočtu.

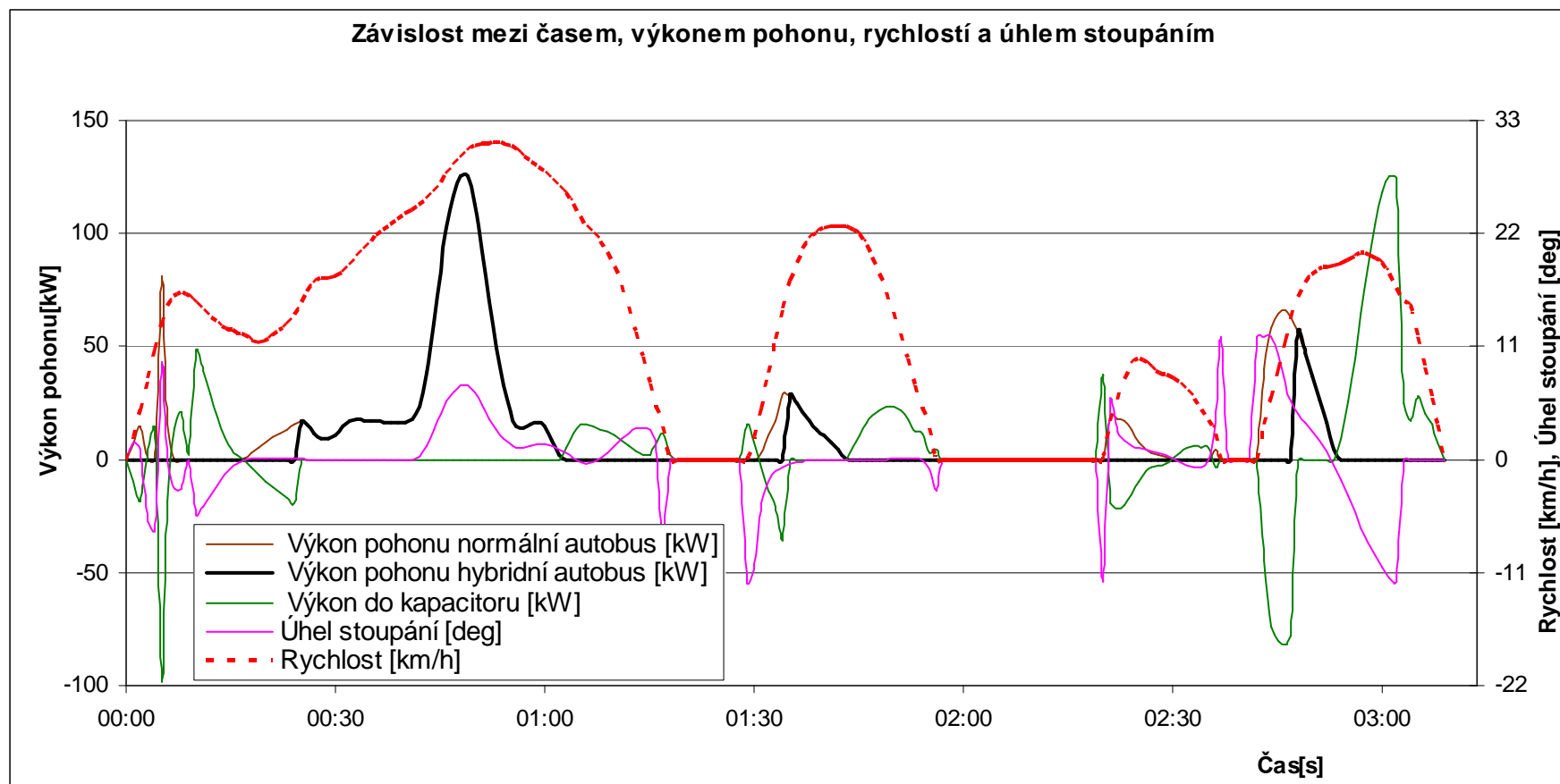
Z důvodu zavedení stoupání a klesání trasy bylo zapotřebí provést úpravu výpočtového modelu. Změněn byl výpočet valivého odporu (4**):

$$O_f = G_v f_r \cos \alpha = m g f_r \cos \alpha = 9030 * 9.81 * 0.01 * \cos \alpha = 885,8 * \cos \alpha [N]$$

A dále byl zaveden odpor stoupání O_s (1**):

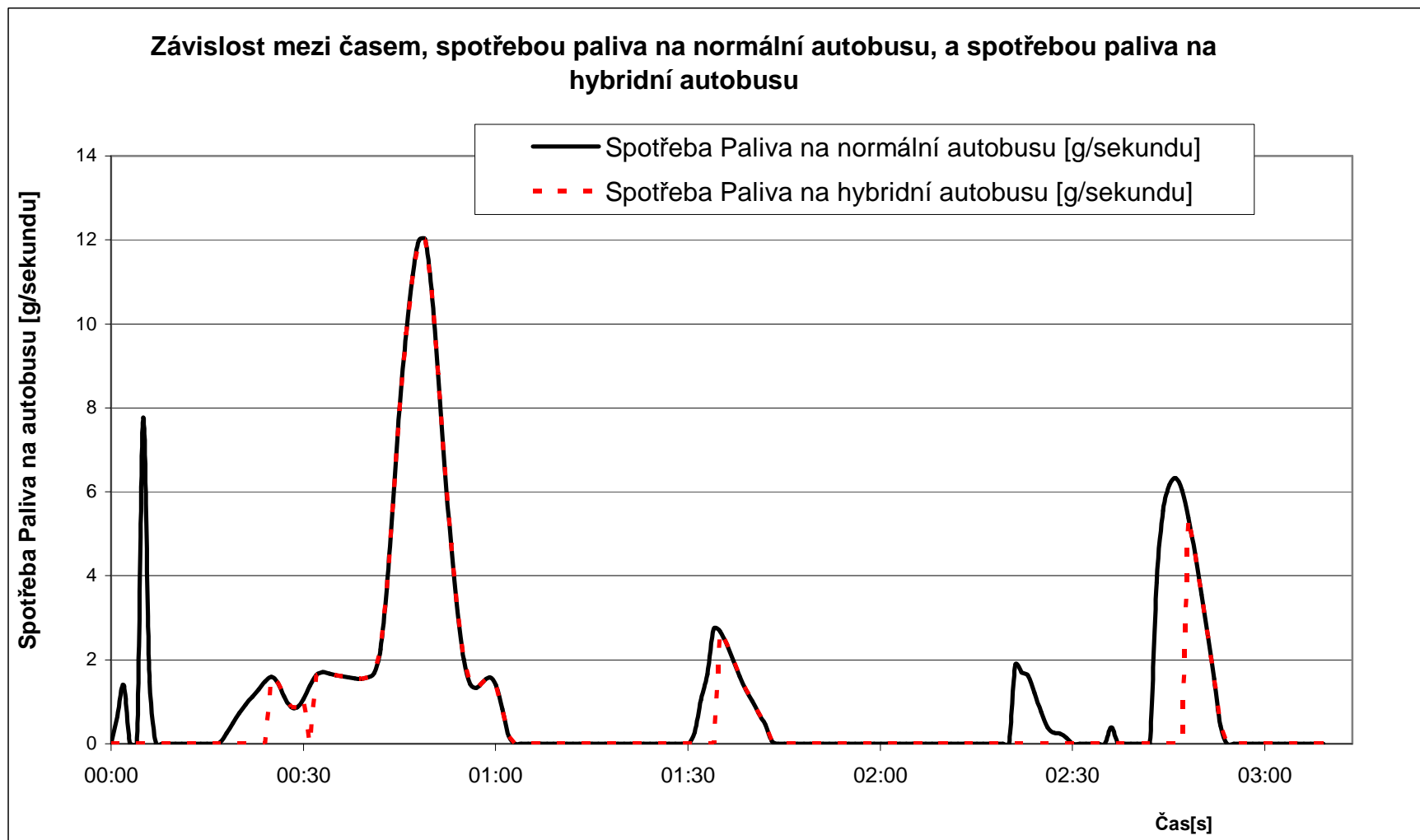
$$O_s = G * \sin \alpha = m g * \sin \alpha [N]$$

5.4.1 Jízda na lince číslo 15 od Husova do Šaldovo náměstí



Graf 5.5 Závislost mezi časem, výkonem pohonu, úhlem stoupáním a rychlostí na lince číslo 15.

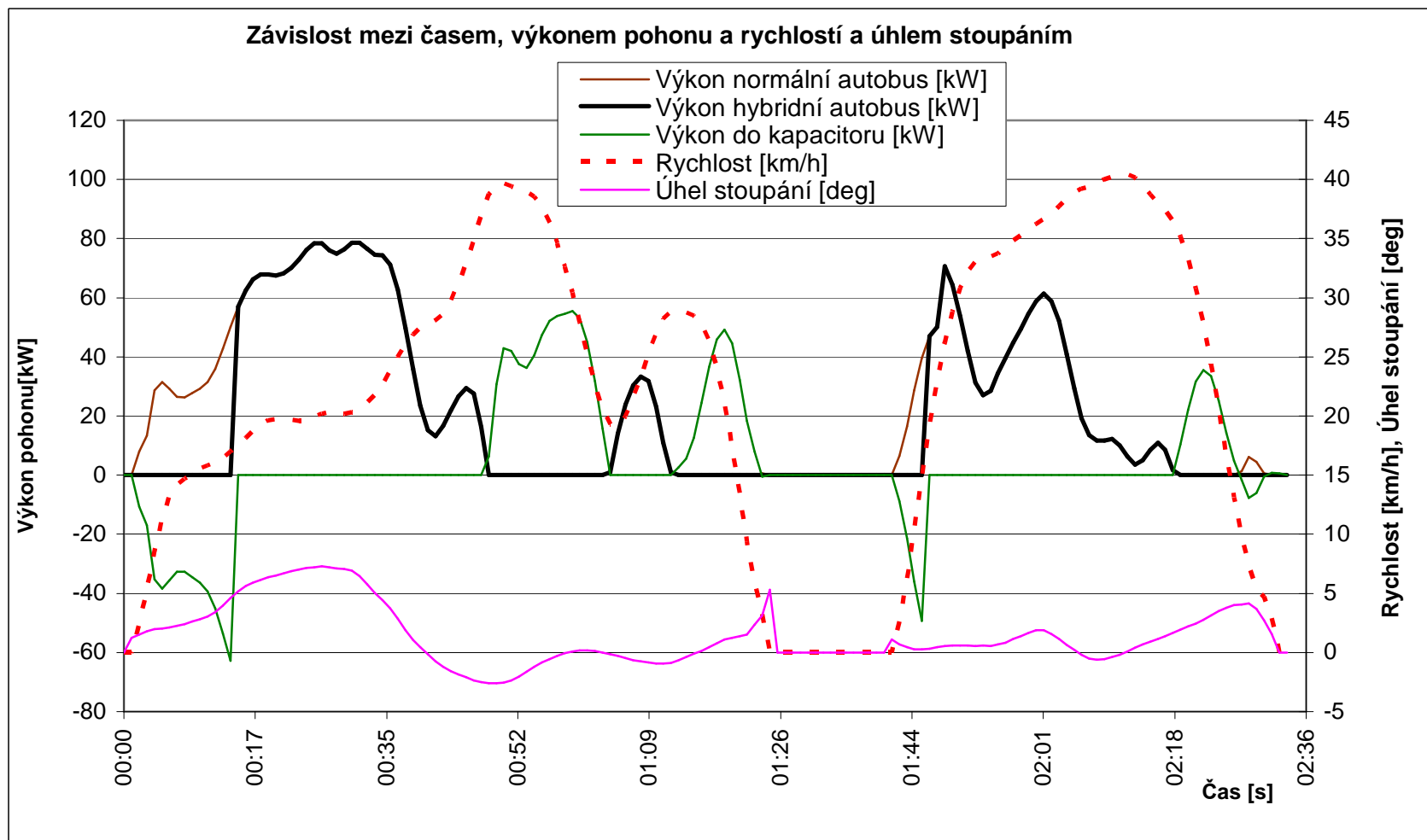
Maximální úhel stoupání je 12° . Maximální výkon pohonu hybridního autobusu je $P = 125,48$ [kW] při spotřebě paliva 12 [g/sekundu] v čase 00:49.



Graf 5.6 Závislost mezi časem a spotřebnou palivou na hibridní autobusu a na normální autobusu na lince číslo 15.

Procentní úsporo palivo je 27,4%.

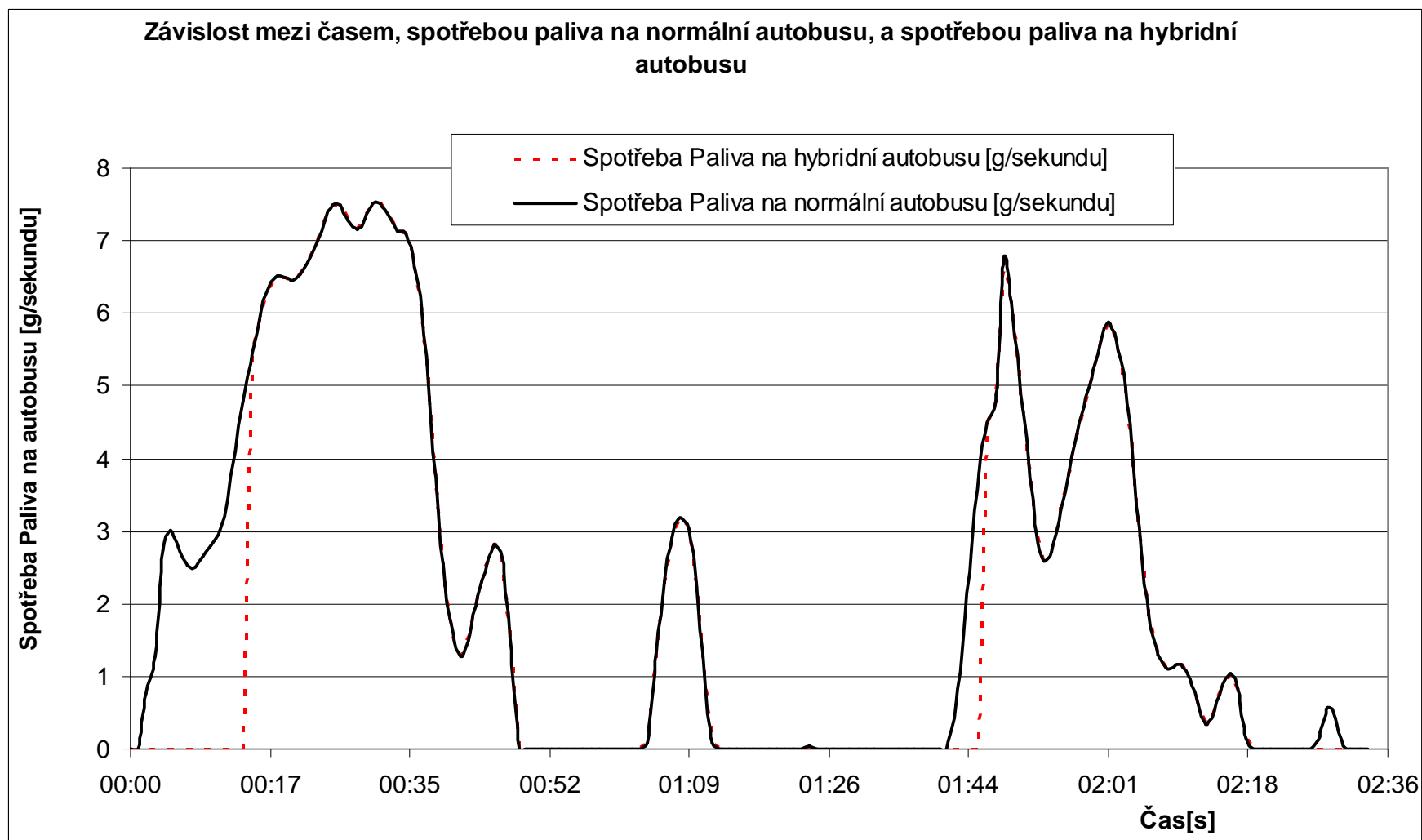
5.4.2 Jízda na lince číslo 15 od Poliklinika do Husova



Graf 5.7 Závislost mezi časem, výkonem pohonu, úhlem stoupáním a rychlostí na lince číslo 15.

Maximální úhel stoupání je $7,3^{\circ}$.

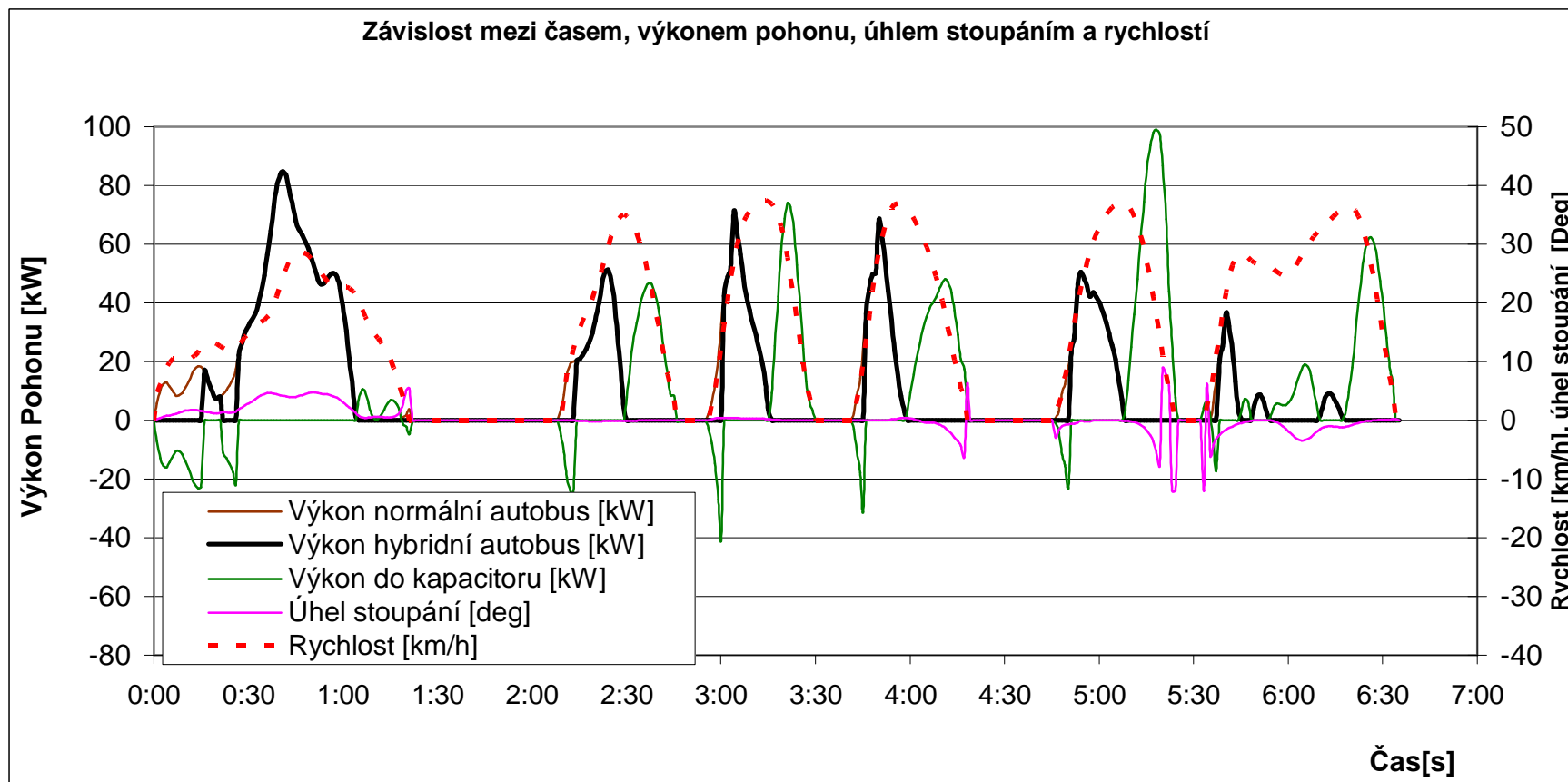
Maximální výkon pohonu hybridního autobusu $P=78,58$ [kW] při spotřebě paliva $7,51$ [g/sekundu] v čase 00:30.



Graf 5.8 Závislost mezi časem a spotřebnou palivou na hibridní autobusu a na normální autobusu na lince číslo 15.

Procentní úsporo palivo je 13,6%.

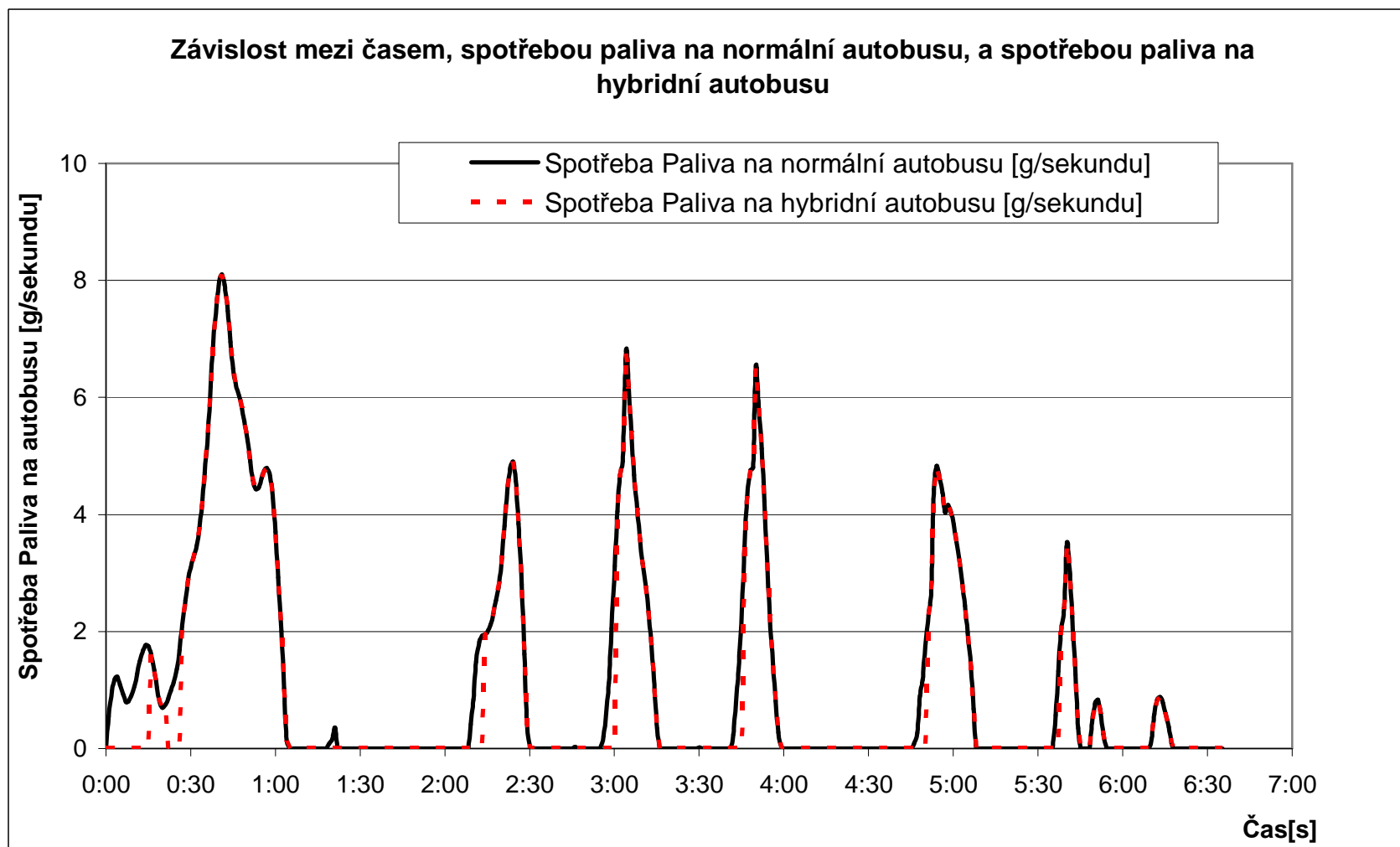
5.4.3 Jízda na lince číslo 25 od Tržní náměstí do Hlávková



Graf 5.9 Závislost mezi časem, výkonem pohonu, úhlem stoupáním a rychlostí na lince číslo 25.

Maximální úhel stoupání je $8,9^{\circ}$.

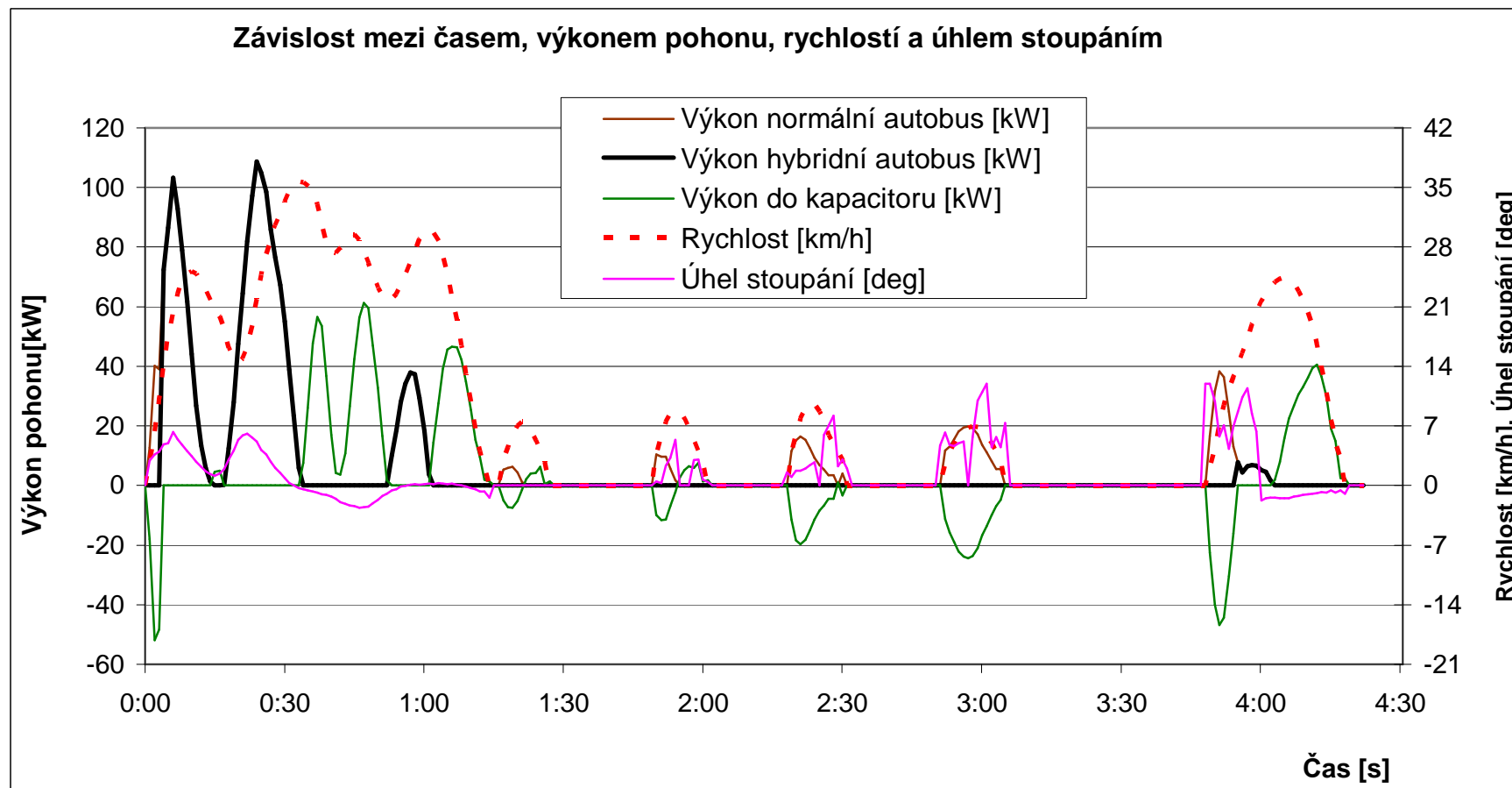
Maximální výkon pohonu hybridního autobusu $P = 84,77$ [kW] při spotřebě paliva je $8,1$ [g/sekundu] v čase 00:41.



Graf 5.10 Závislost mezi časem a spotřebnou palivou na hybridní autobusu a na normální autobusu na lince číslo 25.

Procentní úsporo palivo je 10,5%.

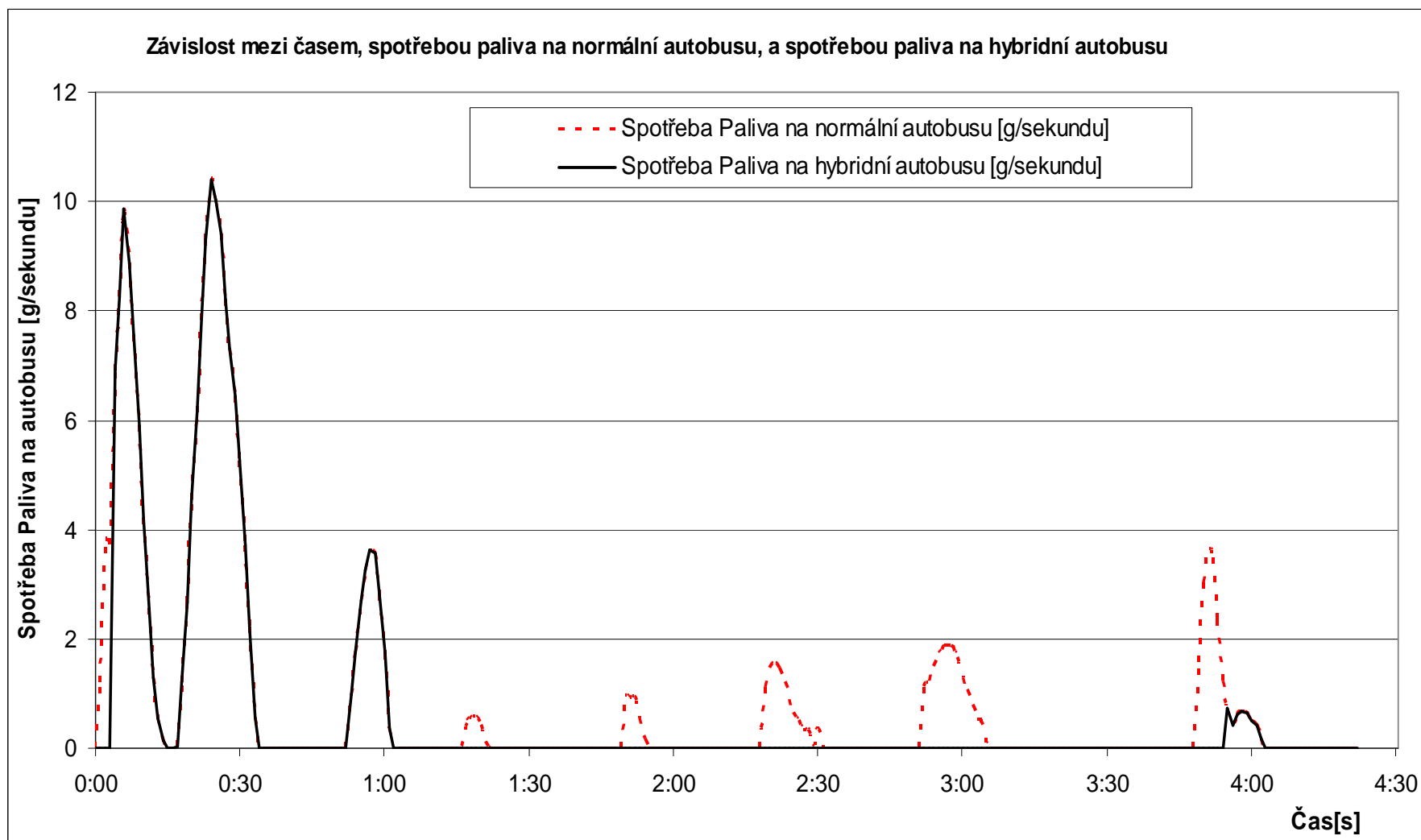
5.4.4 Jízda na lince číslo 12 od Růždol I do Šaldovo náměstí



Graf 5.11 Závislost mezi časem, výkonem pohonu, úhlem stoupáním a rychlostí na lince číslo 12

Maximální úhel stoupání je 12° .

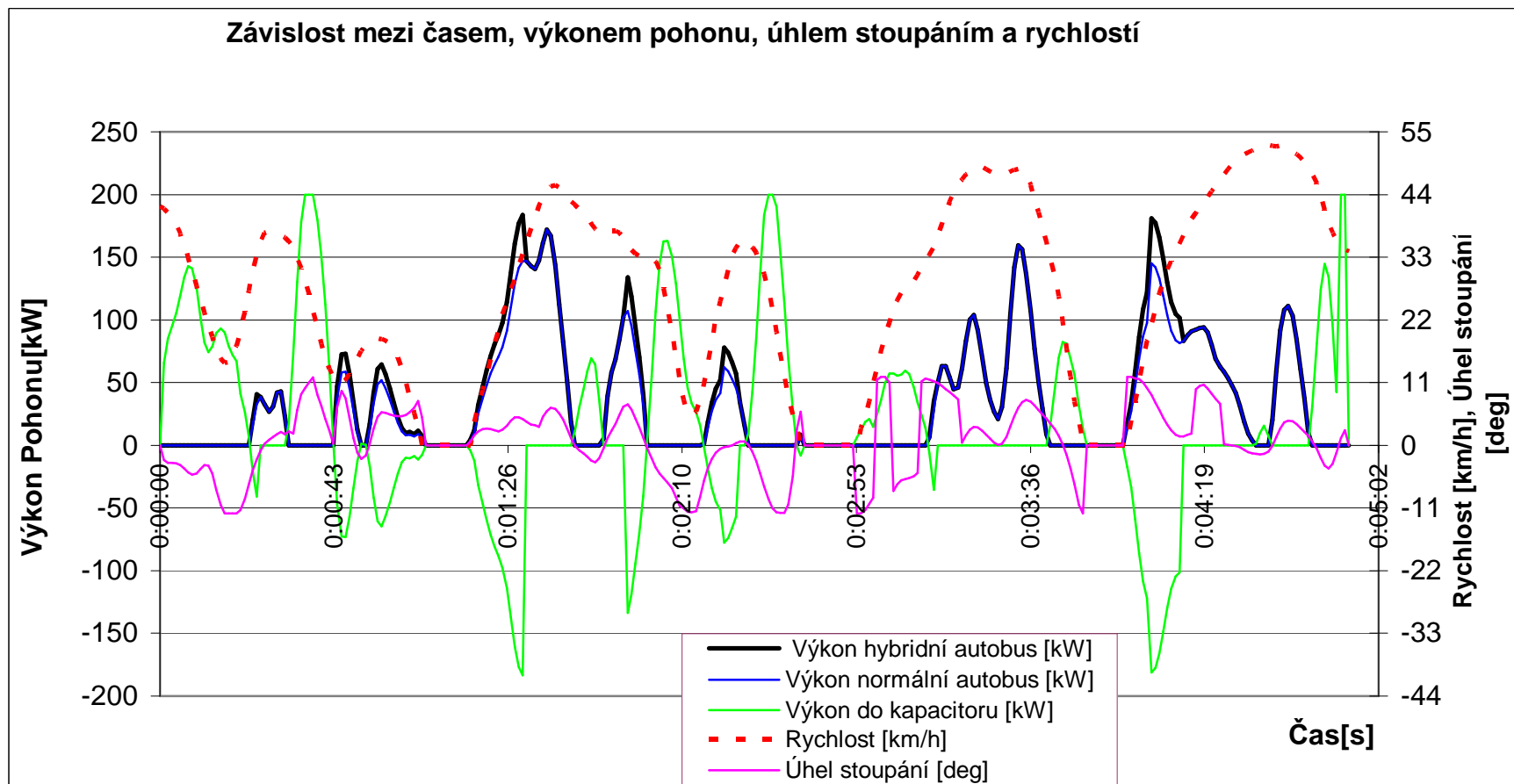
Maximální výkon pohonu hybridního autobusu $P = 108,6$ [kW] při spotřebě paliva je $10,38$ [g/sekundu] v čase 00:24.



Graf 5.12 Závislost mezi časem a spotřebnou palivou na hibridní autobusu a na normální autobusu na lince číslo 12.

Procentní úsporo palivo je 24,4%.

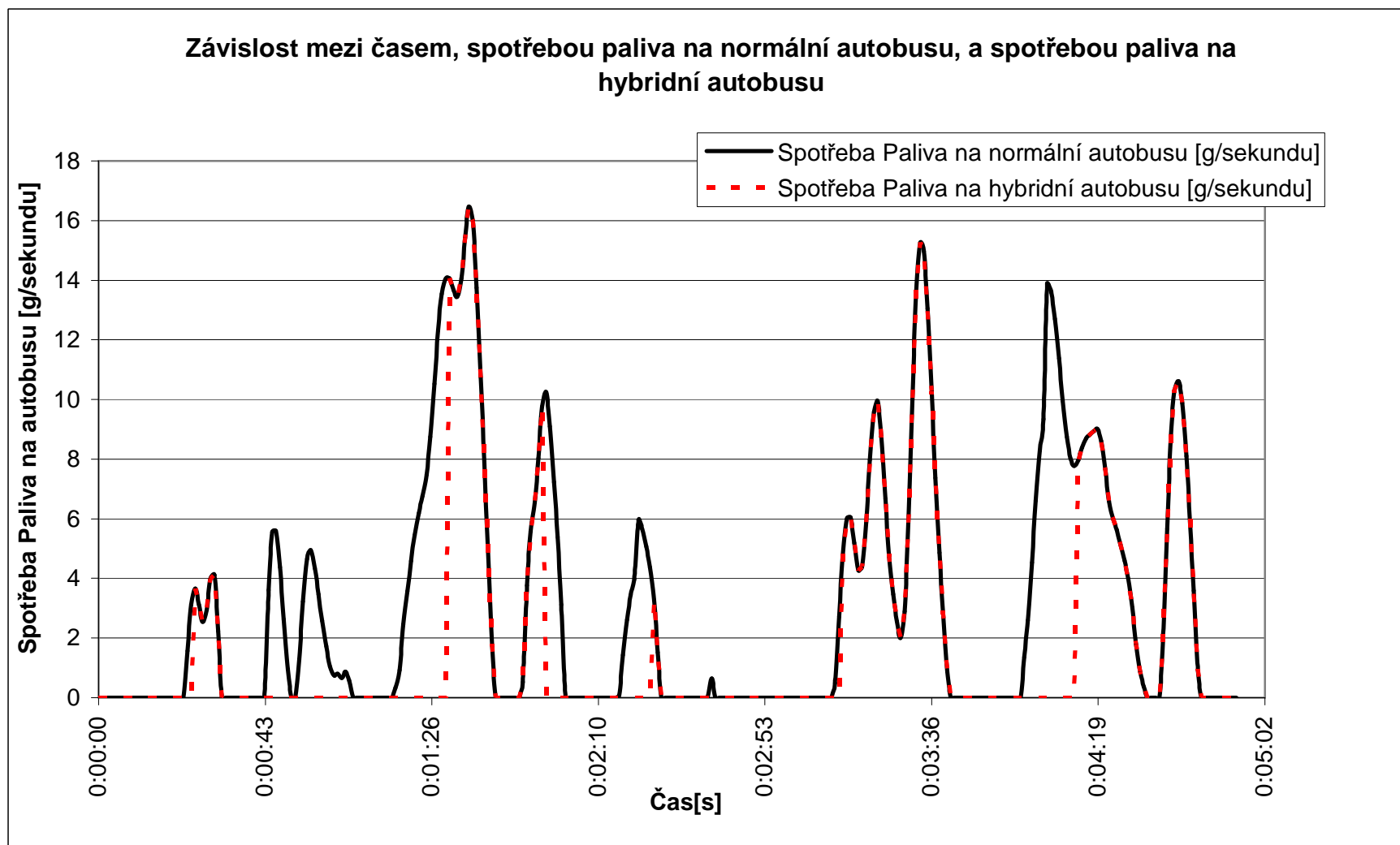
5.4.5 Jízda na lince číslo 30



Graf 5.13 Závislost mezi časem, výkonem pohonu, úhlem stoupáním a rychlostí na lince číslo 30

Maximální úhel stoupání je $11,9^{\circ}$.

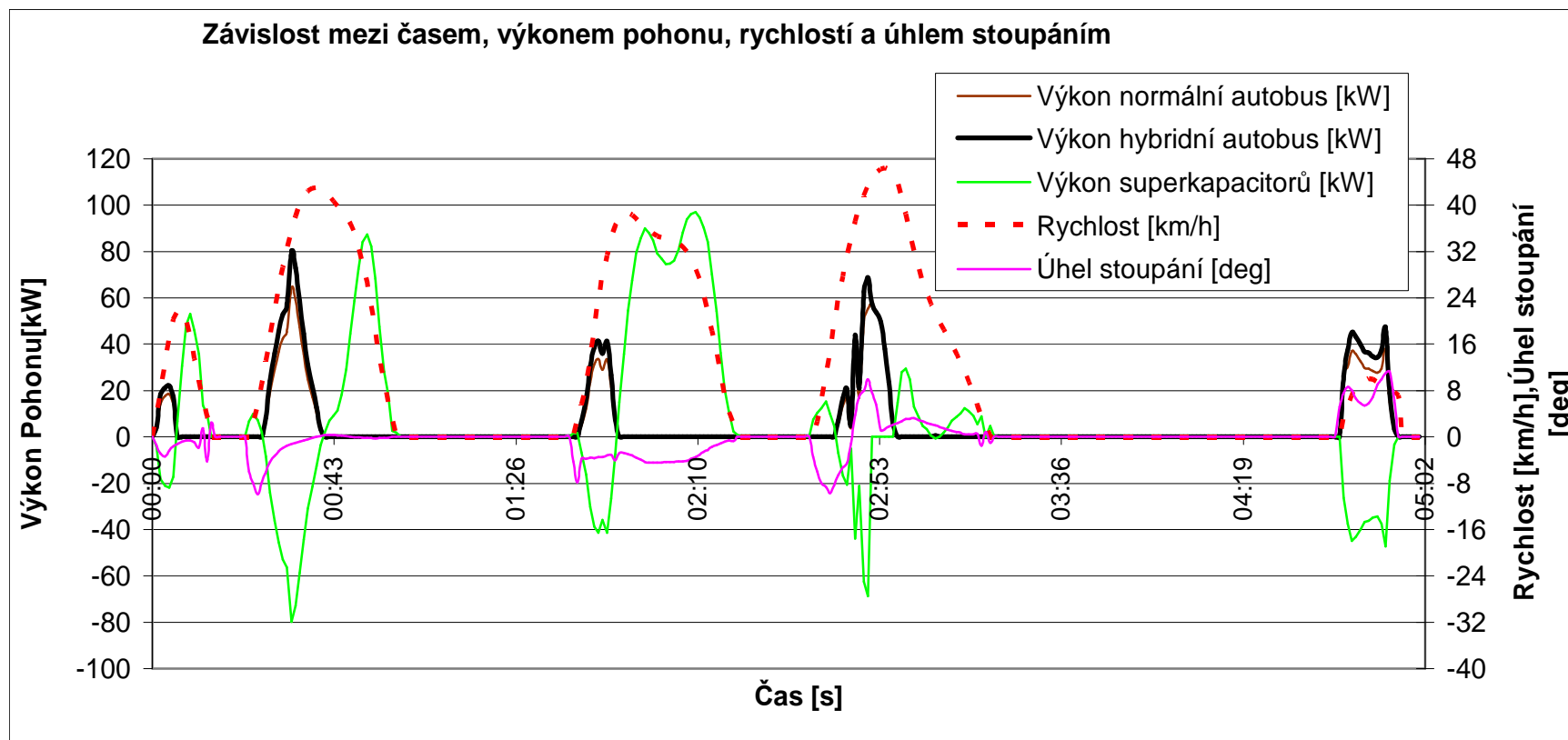
Maximální výkon pohonu hybridního autobusu je $P = 183,6$ [kW] v čase 01:30 při spotřebě paliva je 16,46 [g/sekundu] v čase 01:36.



Graf 5.14 Závislost mezi časem a spotřebnou palivou na hybridní autobusu a na normální autobusu na lince číslo 30.

Procentní úsporo palivo je 37,8 %.

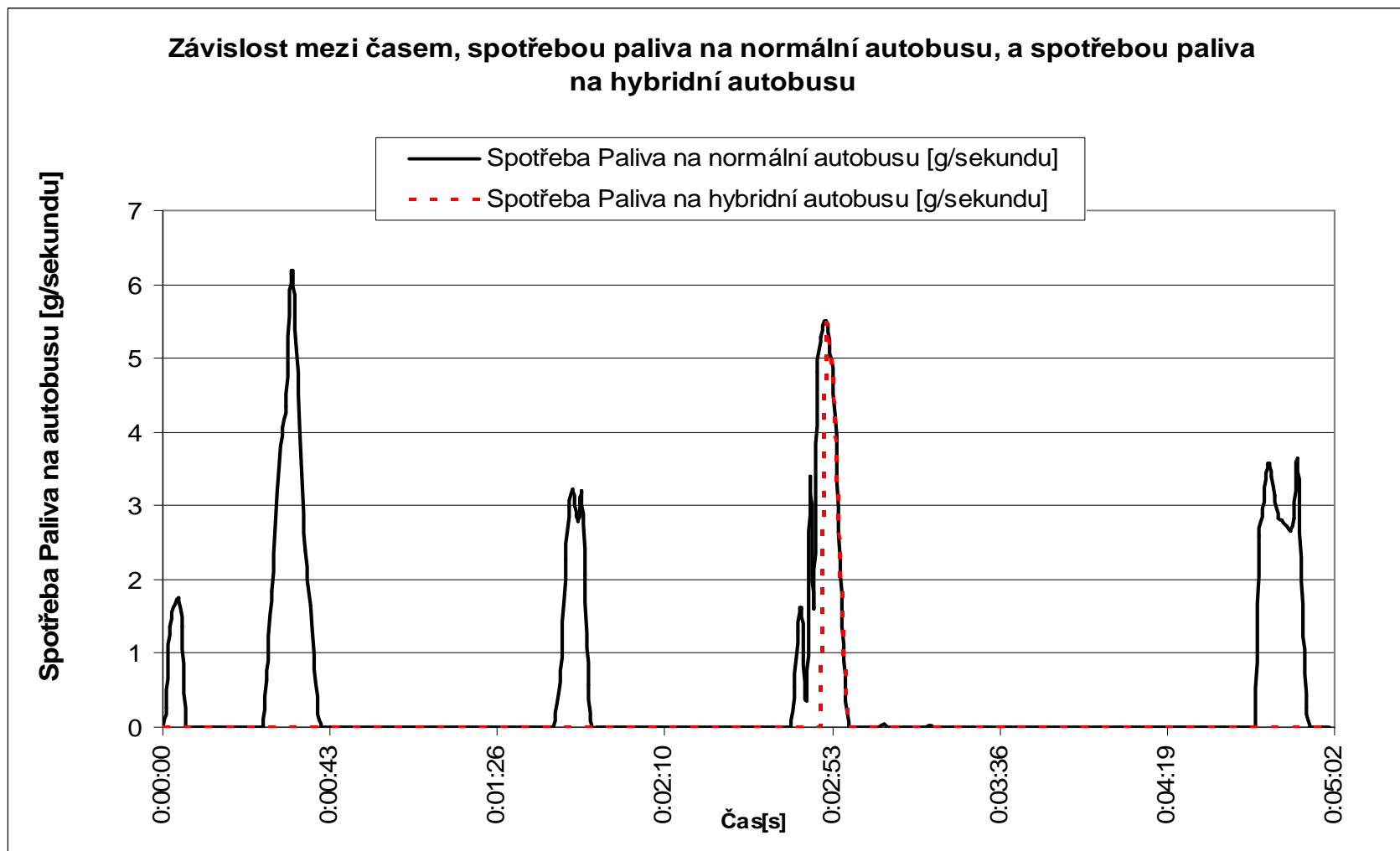
5.4.6 Jízda na lince číslo 12 od Pavlovice Letná do Dožínková



Graf 5.15 Závislost mezi časem, výkonem pohonu, rychlostí a úhlem stoupáním na lince číslo 12.

Maximální úhel stoupání je $11,3^{\circ}$. Maximální výkon pohonu hybridního autobusu je $P = 79,88$ [kW] v čase 00:33.

Maximální spotřebná paliva pro hybridní autobus je 5,5 [g/sekundu] v čase 2:51. Maximální spotřebná paliva pro normální autobus je 6,15 [g/sekundu] v čase 00:33.



Graf 5.16 Závislost mezi časem a spotřebnou palivou na hybridní autobusu a na normální autobusu na lince číslo 12.

Procentní úsporo palivo je 84,7%.

6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo ukázat problematiku hybridních pohonů a znázornit jejich použití na vozidlech určených pro dopravu a představit některé modely od výrobců autobusů. Dále byl v rámci bakalářské práce sestaven zjednodušený výpočtový model klasického a hybridního autobusu s paralelní koncepcí. Tento model uvažuje toky výkonů ze spalovacího motoru na kola vozidla a u paralelní koncepce i tok výkonu rekuperovaný do uložiště energie v průběhu brždění. Model dále uvažuje uvolňování energie a její využití pro pohon autobusu při rozjezdu a to až do stanovené rychlosti.

Výpočtový model byl aplikován na různé druhy jízdy s cílem určit úsporu paliva. Výsledky ukazují, že úspora paliva je závislá na stylu jízdy. V případě plynulé městské jízdy, s menším počtem zastavení, byla vypočtena úspora paliva přibližně 20%. Při agresivnější jízdě, vyznačující se prudšími akceleracemi a častějšími úplnými zastaveními vozidla dochází k častějšímu zapojení hybridní technologie. Z tohoto důvodu byla zaznamenána vyšší úspora paliva přibližně 26%. Z důvodu přímé závislosti produkce skleníkových plynů na spotřebě paliva, lze předpokládat totožné snížení jejich produkce.

Dále byly provedeny podobné výpočty pro linky v Liberci, které byly založeny na naměřených datech z reálného jízdního profilu v tomto městě pomocí systému GPS. Výsledky ukazují úsporu paliva v rozmezí zhruba 10 až více než 50%.

Výsledky tedy ukazují opodstatněnost použití hybridního pohonu, jakožto výrazného technického pokroku v pohonu vozidel, u městského autobusu z důvodu jeho četného využití díky charakteru provozu s častými rozjezdy.

PŘEHLED POUŽÍVANÝCH SYMBOLŮ

V	rychlost	[km.h ⁻¹], [m.s ⁻¹]
n_m	otáčky motoru	[ot.min ⁻¹]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
r_d	dynamický poloměr kola	[m]
i_c	celkový převodový poměr	[-]
V_{max}	maximální rychlost	[km.h ⁻¹]
F_ψ	celkový jízdní odpor	[N]
α	stoupání	[°]
α_{max}	maximální stoupání	[°]
c_x	součinitel odporu vzduchu	[-]
ϑ	součinitel vlivu rotačních částí	[-]
m_c	celková hmotnost autobusu	[kg]
g	gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
S_č	velikost čelní plochy autobusu	[m ²]
š	šířka autobusu	[m]
h	výška autobusu	[m]
f	součinitel valivého odporu	[-]
v	rychlost	[m.s ⁻¹]
P_{max}	maximální výkon	[W]
η_m	účinnost motoru	[-]
η	účinnost přeměny energie	[-]
M_m	točivý moment motoru	[Nm]
F_V	výsledný odpor autobusu	[N]
E_R	energie pro rozjezd autobusu	[J]
P_R	výkon pro rozjezd autobusu	[W]
P_Z	výkon získaný během stání v zastávce	[W]
E	energie paliva	[MJ.km ⁻¹]
E_{mh}	energie paliva na motohodinu	[MJ.mh ⁻¹]
E_{mm}	energie paliva na motominutu	[MJ.mm ⁻¹]

W	průměrná práce na 1 km	[J]
s	potřebná dráha	[m]
O_f	odpor valení	[N]
O_v	odpor vzduchu	[N]
O_s	odpor stoupání	[N]
O_z	odpor setrvačný	[N]
F_k	celkový jízdní odpor	[N]
S_v	čelní plocha vozidla	[m ²]
ρ_a	měrná hustota vzduchu	[kg.m ⁻³]
a	zrychlení vozidla	[m/s ²]
m	hmotnost vozidla	[kg]
ϑ	součinitel rotačních částí	[-]
O_{zp}	odpor zrychlení posuvné části	[N]
O_{zr}	odpor zrychlení rotačních částí	[N]
G	celková tíha	[N]
α	úhel stoupání	[deg]
P	výkon	[W], [kW]

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] Prezentace Hybridní Pohony
- [2] Petříček O. –Pracovní zpráva 2003
- [3] ČEŘOVSKÝ, Z.: Hybridní automobilůa výzkumné pracovištěhybridních pohonů
[online], dostupný z WWW: <<http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2002/k314-SYMEP.pdf>>.
- [4] Zdeněk Čeřovský: Hybridní pohony automobilů a výzkumné pracoviště hybridních pohonů
- [5] Bc. Radek Vosáhlo: Modelové řízení hybridních pohonů automobilů MHD
- [6] Vlk, F.: Alternativní pohony motorových vozidel. 1. vydání. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2004. 234 s. ISBN 80-239-1602-5.
- [7] Kameš, J.: Alternativní pohon automobilů. Praha: Ben – technická literatura, 2004. 231 s.
- [8] Morkus, J.: Studijní materiály, ČVUT v praze , 2013.
- [9] Barnitt, R.A.; Chandler, K.: New York City Transit Hybrid (125 Order) and CNG Transit Buses. Final Evaluation Results. Technical Report NREL/TP-540-40125, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 2006.
- [10] Barnitt, R.A.: In-Use Performance Comparison of Hybrid Electric, CNG and Diesel Buses at New York City Transit. SAE Technical Paper 2008-01-1556. Society of Automotive Engineers, Warrendsale, PA, USA, 2008.